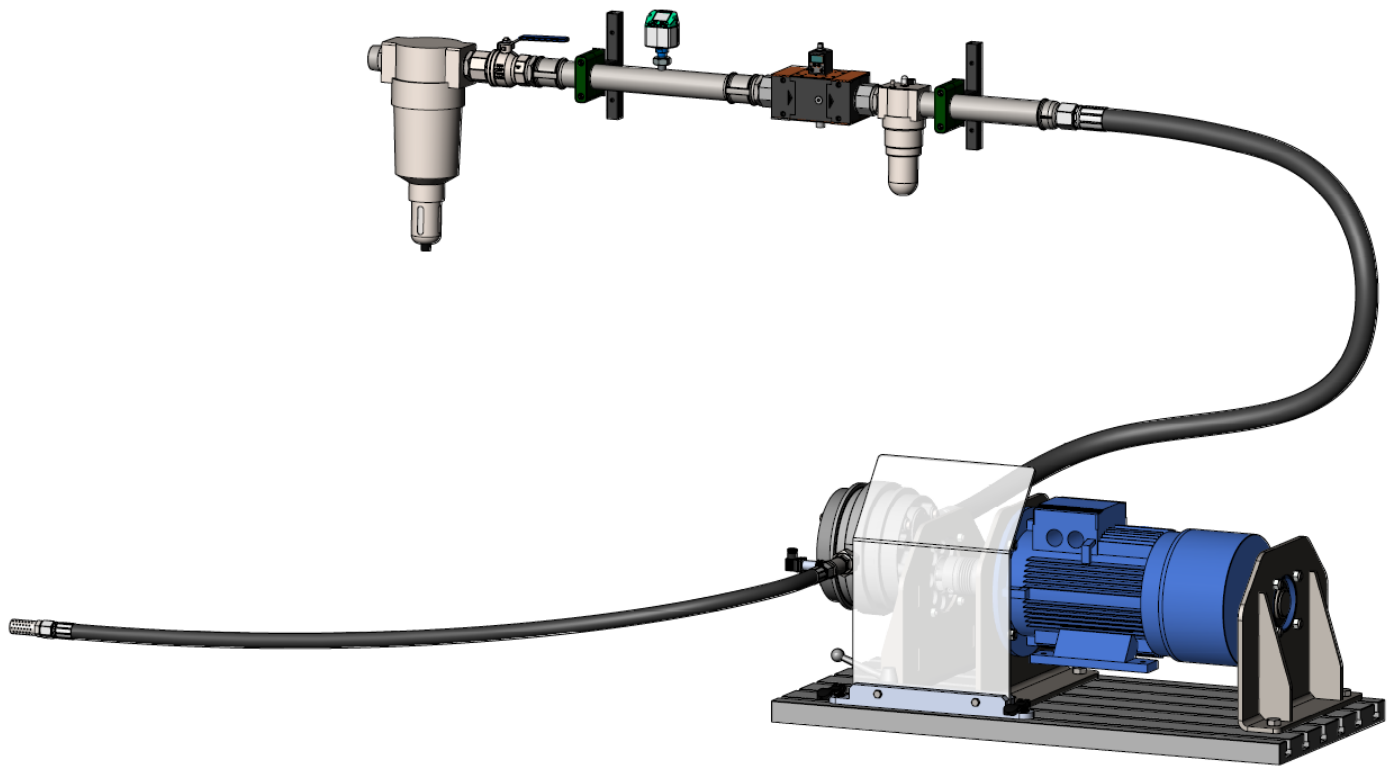




Testopstelling voor luchtmotoren

Auteur:	Geert Smedes
Studentnummer:	13029274
Opleiding:	Werktuigbouwkunde
Onderwijsinstituut:	De Haagse Hogeschool
Bedrijf:	Globe Airmotors B.V.
Bedrijfsbegeleider:	Dhr. H. Wannet
Plaats:	Alphen aan den Rijn
Docentbegeleider:	Dhr. R. van der Meulen
Waarnemend begeleider:	Dhr. E. de Wit

Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van mijn afstudeeropdracht voor de studie Werktuigbouwkunde aan de Haagse Hogeschool te Delft. De afstudeerstage is gelopen bij het bedrijf Globe Airmotors te Alphen aan den Rijn.

Het doel van de afstudeerstage is om als ontwerper een meetopstelling te creëren zodat een prototype van een nieuw type luchtmotor geanalyseerd kan worden, eveneens als het controleren van de in het verleden gemeten gegevens van bestaande motoren. Ook geeft het natuurlijk de kans om aan te tonen dat de student voldoet aan het competentieprofiel Bachelor of Engineering. Bovendien dient het als gelegenheid om praktische werkervaring binnen een bedrijf op te doen en nieuwe kennis te vergaren.

Het verslag is geschreven voor de afstudeerbegeleiders van de opleiding Werktuigbouwkunde, de opdrachtgever en natuurlijk toekomstige afstudeerders.

Ik wil het bedrijf Globe, en vooral mijn bedrijfsbegeleider Han Wannet, bedanken voor de gelegenheid om hier mijn afstudeerstage te mogen lopen. Tijdens het traject heb ik een hoop ervaring en kennis opgedaan. Ook wil ik mijn afstudeerbegeleider Rudy van der Meulen bedanken voor de ondersteuning en feedback tijdens de stageperiode.

Alphen aan den Rijn, 16 December 2019

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	1
Verklarende woordenlijst.....	2
Symbolenlijst	3
1. Inleiding	4
2. Probleem- en doelstelling	5
2.1 Probleemstelling.....	5
2.2 Doelstelling.....	5
2.3 Projectgrenzen	6
2.4 Programma van Eisen	6
3. Hoofd- en deelvragen.....	10
3.1 Hoofdvraag.....	10
3.2 Deelvragen.....	10
3.3 Onderzoek	10
4. Analysefase.....	11
4.1 Deelvraag 1.....	11
4.1.1 Toepassingsgebied en gedrag van luchtmotoren	11
4.1.2 Meetdoeleinden	12
4.2 Deelvraag 2.....	12
4.3 Deelvraag 3.....	13
4.3.1 Sensorgegevens interpreteren.....	13
4.3.2 Bepalen van nauwkeurigheid	14
4.4 Deelvraag 4.....	15
4.5 Deelvraag 5.....	15
4.6 Deelvraag 6.....	16
5. Conceptuele fase.....	17
5.1 Functieanalyse.....	17
5.2 Morfologisch overzicht.....	18
5.3 Concepten	21
5.3.1 Concept 1.....	21
5.3.2 Concept 2.....	22
5.3.3 Concept 3.....	24
5.4 Kesselring methode.....	25
5.4.1 Weegfactoren.....	25
5.4.2 Keuzematrix concepten	26
5.4.3 Conceptevaluatie.....	26

5.5 Definitief concept	27
5.5.1 Aanvullingen en aanpassingen	27
5.5.2 Definitieve eindconcept omschrijving	27
5.5.3 Keuzematrix definitieve eindconcept	28
6. Detailleringfase	30
6.1 Componentenkeuze	30
6.1.1 Krachtopnemer	30
6.1.2 Koppelsensor	32
6.1.3 Toerental sensor	32
6.1.4 Druksensor	33
6.1.5 Debietsensor	34
6.1.6 Elektronische drukregelaar	35
6.1.7 Koppeling	36
6.2 Gecombineerde meetafwijking	37
6.2.1 Gecombineerde meetafwijking vermogen	38
6.2.2 Gecombineerde meetafwijking rendement	39
6.2.3 Overzicht meetafwijkingen	40
6.3 Definitief ontwerp	41
6.3.1 Het model	41
6.3.2 Ontwerpkeuzes	43
6.4 Ontwerpschema's	47
6.4.1 Processtromen	47
6.4.2 Pneumatisch schema	47
6.5 Kostenprijscalculatie	49
6.6 Toetsing PvE	49
7. Conclusie en aanbevelingen	50
7.1 Conclusie	50
7.2 Conclusie opdrachtgever	50
7.3 Aanbevelingen	51
Literatuurlijst	52
Bijlage A: Bedrijfsbeoordeling	56
Bijlage B: Competentieverantwoording	58
Bijlage C: Onderzoek meettechnieken	61
C.1 Luchtdruk	61
Barometer	61
Manometer	62

Druktransmitter	64
Vergelijkingstabel druk meettechnieken	65
C.2 Debiet	66
Verschildruk flowmeter	66
Thermische flowmeter	66
Coriolis massaflowmeter	67
Vortex flowmeter	68
Variable area flowmeter	69
Turbine flowmeter	69
Ultrasonische flowmeter	70
Vergelijkingstabel debiet meettechnieken	71
C.3 Toerental	72
Digitale hand tachometer	72
Optische sensor	72
Nabijheid sensor	73
Incrementele encoder	74
Vergelijkingstabel toerental meettechnieken	75
C.4 Koppel	76
Rekstrookjes	76
Reactie koppel sensor (statisch)	77
Roterende koppel sensor (dynamisch)	77
Elektromotor	79
Vergelijkingstabel koppel meettechnieken	80
Bijlage D: Onderzoek krachtopnemers	81
D.1 Motoren	81
Elektromotor	81
Luchtmotor	84
D.2 Hydraulische pomp	85
D.3 Remmen	85
Mechanische rem	85
Elektromagnetische rem	85
Vergelijkingstabel krachtopnemers	88
Bijlage E: Onderzoek sensor terminologie	89
E.1 Sensor terminologie	89
Nauwkeurigheid	89
Precisie/reproduceerbaarheid	89

Resolutie	90
Sensitiviteit	91
Lineariteit	91
Hysteresis	92
Overige	93
E.2 Meetonzekerheid en Total Error Band (TEB).....	93
Meetonzekerheid en TEB berekenen	94
Bijlage F: Berekeningen	96
F.1 Enkele ondersteuning elektromotor	96
F.2 Dubbele ondersteuning elektromotor	100
F.3 Tolerantie bepaling uitlijning.....	102
Bijlage G: Stuklijsten	104
G.1 Stuklijst testopstelling.....	104
G.2 Stuklijst hoofdleiding	105
Bijlage H: Datasheets/dimensies testmotoren.....	106
H.1 Luchtmotor prototype 10kW	106
H.2 Datasheet VS8C.....	107
H.3 Datasheet VS10C.....	108
H.4 Datasheet VS12C.....	109
H.5 Datasheet RM310	110
H.6 Datasheet RM410	111
Bijlage I: Datasheets componenten testopstelling.....	112
I.1 Elektromotor Sg160L-4.....	112
I.2 Druksensor AE-SML-Serie	113
I.3 Debietsensor VA520	115
I.4 Elektronische drukregelaar REGTRONIC serie.....	116
I.5 Balgkoppeling BKL series	117
Bijlage J: Tekeningen productieonderdelen	118
J.1 Montagebeugel elektromotor	118
J.2 Montagebeugel beschermkap	119
J.3 Beschermkap.....	120
J.4 T-gleuf plaat	121

Samenvatting

Dit rapport behandelt het ontwerpproces van een testopstelling voor luchtmotoren. Deze opstelling is belangrijk omdat er een ontwikkeling plaatsvindt voor een nieuw prototype van een luchtmotor. Buiten een geschatte vermogenspiek van 10kW is er nog niets van de specificaties bekend en zal dit nader onderzocht moeten worden. Bovendien is het gewenst dat overige motoren uit het assortiment, indien geschikt, toegepast kunnen worden om te meten. Specificaties van deze motoren zijn mogelijk gedateerd en dienen eventueel herdefinieerd te worden.

Het rapport begint met een probleem- en doelstelling waaruit een duidelijke opdrachtsomschrijving geformuleerd kon worden. Aan de hand van deze omschrijving kon een hoofdvraag met bijbehorende deelvragen worden opgesteld. Beantwoording van deze vragen was benodigd om een uiteindelijk ontwerp, eveneens als een Programma van Eisen (en wensen) te kunnen realiseren.

Om de deelvragen te beantwoorden is onderzoek verricht, wat zich onderverdeelt in de onderwerpen *meettechnieken*, *krachtopnemers* en *sensor terminologie*. Buiten alleen de terminologie rond sensoren te behandelen is ook gekeken naar de wijze om de nauwkeurigheid van een sensor te achterhalen.

Aan de hand van de resultaten uit het onderzoek en het beantwoorden van de deelvragen kon het traject vervolgd worden in de vorm van de conceptuele fase. Allereerst is een functieanalyse gecreëerd voor de gewenste functies van de meetopstelling. Op basis van deze analyse is een morfologisch overzicht gevormd waar in de mogelijke functievervullers, grotendeels afkomstig van het onderzoek, worden getoond. Gesteund door dit overzicht konden concepten worden gegenereerd welke vervolgens ten opzichte van elkaar zijn afgewogen. Dankzij de afwegingen en een conceptevaluatie met de opdrachtgever is een definitief eindconcept gecreëerd.

Het definitieve eindconcept is in de detailleringsfase vertaald naar een gedetailleerd ontwerp. Allereerst is een uitgebreide componentenkeuze behandeld, waarin alle meetonzekerheden zijn verduidelijkt. Deze onzekerheden zijn uiteindelijk gecombineerd om een indruk te krijgen van de samenhangende nauwkeurigheid van de opstelling. Nadat duidelijk was welke componenten benodigd waren kon het ontwerp gecreëerd worden, inclusief schema's en stuklijsten. Tot slot is een kostencalculatie gemaakt van het gemaakte ontwerp.

Gebleken is dat het ontwerp voldoet aan de gestelde eisen in het Programma van Eisen. Echter zijn er nieuwe ontwikkelingen met betrekking tot het beoogde prototype. Zo is er nog steeds geen duidelijkheid over het functioneren van het model, eveneens dat bij toch functioneren een 50kW variant zal worden ontwikkeld aangezien de belangen hier voor een stuk groter zijn. Het eerste prototype van 10kW zal op eenvoudigere wijze getest worden om te concluderen of de ontwikkeling voor een grotere variant van start kan gaan. Indien dit het geval is zal het beschreven meetprincipe van het ontwerp worden meegenomen in de ontwikkeling naar een grotere meetopstelling welke in staat is beiden nauwkeurig te testen.

Verklarende woordenlijst

AutoCAD	CAD-software om technische modellen en tekeningen te creëren.
BSP	<i>British Standard Pipe</i> : Een internationaal erkende technische standaardmaatvoering voor schroefdraad in pijpansluitingen.
CW	<i>Clockwise</i> : Draairichting met de klok mee.
CCW	<i>Counterclockwise</i> : Draairichting tegen de klok in.
EEM	<i>Eindige-elementenmethode</i> : Methode om krachten, spanningen en vervormingen in een constructie of werkstuk te onderzoeken. Dit wordt gerealiseerd door middel van het versimpelen van een constructie of werkstuk tot een netwerk van 'elementen'.
FRL	<i>Filter/Regulator/Lubricator</i> : Dit betreft een pakket van drie verbonden luchtbehandelingscomponenten die kan worden verbonden aan een persluchtleiding. De lucht zal dankzij deze componenten respectievelijk gefilterd, gereguleerd en gesmeerd worden.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> : Een wereldwijd erkende organisatie die verantwoordelijk is voor het controleren en delen van standaardisatieprincipes binnen de elektro- en gerelateerde techniek.
ISO	<i>Organization for Standardization</i> : Een wereldwijd erkende organisatie die verantwoordelijk is voor het controleren en delen van een grote verscheidenheid aan standaardisatieprincipes binnen de techniek.
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> : Een nationaal erkende organisatie binnen Amerika die verantwoordelijk is voor het controleren en delen van standaardisatieprincipes binnen de elektro- en gerelateerde techniek.
NPT	<i>National Pipe Thread</i> : Een nationaal erkende technische standaardmaatvoering in Amerika voor schroefdraad in pijpansluitingen.
PPR	<i>Pulses Per Revolution</i> : De output van bijvoorbeeld een encoder in de vorm van pulsen per omwenteling. Hiermee kan dan het toerental van een draaiend object worden geconstateerd.
PvE	<i>Programma van Eisen (en Wensen)</i> : Een document waarin de eisen (en wensen) van een product omtrent de productontwikkeling worden getoond. Het eindresultaat wordt getoetst aan de hand van dit document.
Solidworks	CAD-software om technische modellen en tekeningen te creëren.
TEB	<i>Total Error Band</i> : Een spreiding van de mogelijke totale meetafwijking van een sensor tegenover de werktemperatuur. Hierin zijn alle deelafwijkingen van de sensor reeds meegenomen.
tpm	<i>Toeren per minuut</i> : Een eenheid voor de draaisnelheid van een object, zoals een as. Hiermee wordt aangegeven hoeveel rotaties het object draait binnen een minuut.

Symbolenlijst

<i>Symbol</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Beschrijving</i>
D_i	mm	Binnendiameter
D_o	mm	Buitendiameter
e	%	Error
f	Hz	Frequentie
F	N	Kracht
h	mm	Hoogte
I	A	Stroomsterkte
I	mm ⁴	Oppervlaktetraagheidsmoment
J	kg·m ²	Massatraagheidsmoment
L	m	Lengte
m	kg	Massa
M	Nm	Moment
n	tpm	Toerental
p	barg	Druk
P	W	Vermogen
Q	m ³ /sec	Debiet
T	Nm	Koppel
TEB	%	Sensor error
U	V	Spanning
V	m ³	Volume
w	mm	Verplaatsing
x	mm	Verplaatsing
η	%	Rendement
σ	Pa	Spanning
σ	-	Standaardafwijking
θ	rad	Helling

1. Inleiding

Globe Airmotors is gespecialiseerd op het gebied van luchtmotoren en de applicaties die hier te maken mee hebben. Deze motoren zijn gunstig om toe te passen in bepaalde omgevingen waar verbrandings- en elektromotoren voor gevaarlijke situaties kunnen leiden. Neem als voorbeeld een pompinstallatie in een productieproces voor chemische middelen waarbij explosiegevaar een risico kan zijn. Aangezien luchtmotoren op geheel mechanische wijze kunnen functioneren verlaagt dit een dergelijk risico drastisch. Bovendien kan er gekozen worden uit een assortiment aan verschillende motoren met vermogens van 0,1 tot 23 kW, is er de mogelijkheid op klant specifieke bewerkingen en kunnen ze samengesteld worden met tandwielkasten, regel- en remsystemen.

Er wordt verwacht dat eind 2019 de ontwikkeling van een prototype van een nieuw type luchtmotor afgerond is waarvan specificaties in de praktijk nog onbekend zijn, behalve dat de vermogenspiek ongeveer 10kW bedraagt. Er is veel belangstelling naar dit type motor waardoor deze uitgebreid geanalyseerd moet worden. Hierom is een nieuwe meetopstelling benodigd welke de specificaties van dit prototype uitgebreid kan meten. Bovendien wordt beoogd dat de specificaties van reeds bestaande luchtmotoren ook getest kunnen worden op deze opstelling, zodat deze informatie kan worden gecontroleerd en waar nodig geherdefinieerd.

De gewenste meetopstelling dient in staat te zijn nauwkeurig de druk van de perslucht, het toerental, het aanwezige koppel en de verbruikte luchtmassa van motoren in een praktijksituatie te meten. Het gewenste meetbereik van de beoogde opstelling bevindt zich ruim om de theoretische specificaties van het prototype. Dit houdt in dat het in staat is om motoren te testen uit de hogere vermogensklasse. Het algehele ontwikkelingsproces van de meetopstelling wordt stapsgewijs verder behandeld in dit rapport.

2. Probleem- en doelstelling

2.1 Probleemstelling

De productie voor een prototype van een nieuw type luchtmotor is op gang, waarvan verwacht wordt dat dit eind 2019 afgerond is. Verwachte specificaties van het model, behalve dat de vermogenspiek ongeveer 10kW betreft, zijn onbekend en zullen uitgebreid geanalyseerd moeten worden. Ook zijn de specificaties van luchtmotoren uit het huidige assortiment mogelijk gedateerd en dienen opnieuw gemeten te worden.

In het verleden is een meetopstelling aanwezig geweest bij het afstudeerbedrijf. Deze opstelling is toegepast om een aantal van de huidige beschikbare brochures te creëren van luchtmotoren uit het bedrijfsassortiment. Echter is deze niet meer compleet en zijn een aantal componenten beschadigd, waardoor deze dient vervangen te worden.

2.2 Doelstelling

De doelstelling van dit project betreft het ontwerpen van een meetopstelling die in staat is om de prestaties en het verbruik van bestaande motoren met een vermogensbereik van 5kW tot 15kW uit het assortiment te meten, en nog belangrijker, het nieuwe verwachte prototype. De elektronische meetresultaten moeten digitaal verzameld, verwerkt en tot slot gevisualiseerd worden. Hierbij is het van belang dat de gewenste nauwkeurigheid van de opstelling behaald kan worden en dat het zo gemakkelijk mogelijk te gebruiken is met betrekking tot de flexibiliteit van inzetbaarheid. Hiermee wordt bedoeld dat makkelijk overgeschakeld kan worden tussen verschillende type motoren betreffende de verschillende afmetingen en aansluitpunten. De gemeten specificaties mogen gecombineerd niet meer dan 5% van de realiteit afwijken.

De opdrachtsomschrijving luidt dus:

Ontwerp en bouw een testopstelling welke in staat is om de prestaties van luchtmotoren te meten binnen een vermogensbereik van 5kW tot en met 15kW met een maximale gecombineerde meetafwijking van 5%, en deze digitaal op te slaan en te visualiseren.

2.3 Projectgrenzen

Om aan te duiden wat wel en niet behandeld wordt tijdens het project, aldus binnen dit rapport, worden er grenzen gesteld aan de activiteiten en de te leveren onderdelen.

Binnen de grenzen:

- Er wordt onderzoek gedaan naar alle onbekende factoren omtrent het samenstellen van een testopstelling op basis van componenten
- Aan de hand van de onderzoeksresultaten worden concepten gecreëerd
- De concepten worden afgewogen ten opzichte van elkaar en besproken met de bedrijfsbegeleider om tot een besluit te komen voor een eindconcept
- Het eindconcept zal worden vertaald naar een definitief ontwerp welke geproduceerd, geassembleerd en geïnstalleerd kan worden
- Er wordt een pneumatisch schema gecreëerd in AutoCAD
- Het definitieve ontwerp zal worden gecreëerd in Solidworks
- Er worden tekeningen gemaakt van de productieonderdelen van het definitieve ontwerp
- Waar nodig worden handberekeningen en materiaalkeuzes gemaakt
- Waar nodig worden EEM simulaties geanalyseerd
- Benodigde meetinstrumenten zullen geselecteerd worden op basis van de gewenste meetnauwkeurigheid
- De onderdelen van het definitieve ontwerp zullen geproduceerd en/of ingekocht worden
- Van de koop- en productieonderdelen wordt een kostencalculatie gemaakt
- Bevindingen van het product worden gedocumenteerd

Buiten de grenzen:

- Er wordt geen onderzoek gedaan naar data-acquisitie (DAQ)
- Er wordt geen onderzoek gedaan naar elektrische componenten welke benodigd zijn voor het DAQ systeem en regelfuncties
- Er wordt geen uitspraak gedaan over de keuze van de elektrische componenten voor het DAQ systeem en regelfuncties
- Meetinstrumenten worden niet door de student gekalibreerd
- Het besturings- en meetprogramma wordt niet door de student geprogrammeerd

2.4 Programma van Eisen

Het Programma van Eisen (PvE) is gecreëerd aan de hand van de opdrachtsomschrijving en overleg met de opdrachtgever, eveneens als de beantwoording op de deelvragen en algemene oriëntatie. De desbetreffende eisen (en wensen) worden getoond in tabel 2.1.

Tabel 2.1: Programma van Eisen van de beoogde meetopstelling.

#	Aspect	Eis/wens	Omschrijving	Meetwaarde	Controlepunt	Bron	Datum	Toetsing ontwerp
Hoofdfunctie								
1	Techniek	Eis	De meetopstelling is in staat een prototype van een bepaalde luchtmotor te testen binnen een vermogensbereik.	5 – 15 [kW]	Inzetbaarheid betreffende prototype	Opdrachtgever	16-09-2019	Voldoet
2	Techniek	Wens	De meetopstelling is in staat luchtmotoren uit het assortiment te testen binnen een vermogensbereik.	5 – 20 [kW]	Inzetbaarheid betreffende luchtmotoren	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet, mits binnen de waarden van eis #5 en #6
3	Techniek	Wens	De meetopstelling is in staat luchtmotoren uit het assortiment te testen met een laag vermogen.	0 – 5 [kW]	Inzetbaarheid betreffende luchtmotoren	Opdrachtgever	13-09-2019	Voldoet gedeeltelijk, mits het koppel hoger is dan 29,7 Nm
4	Techniek	Eis	De meetopstelling is in staat luchtmotoren, onder andere uit het assortiment, te testen tot een bepaald toerental.	0 – 2000 [tpm]	Inzetbaarheid betreffende luchtmotoren	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet
5	Techniek	Wens	De meetopstelling is in staat luchtmotoren, onder andere uit het assortiment, te testen tot een hoger toerental.	0 – 3000 [tpm]	Inzetbaarheid betreffende luchtmotoren	Opdrachtgever	13-09-2019	Voldoet gedeeltelijk, kan tot maximaal ca. 3000 tpm voor korte duur
6	Techniek	Eis	De meetopstelling is in staat een tegenwerkend koppel te genereren bij stilstand.	0 – 190 [Nm]	Optreden gewenste tegenkoppel	Opdrachtgever	25-09-2019	Voldoet
7	Techniek	Eis	De meetopstelling is in staat een testmotor aan te drijven.	0 – 100 [Nm], bij 0 – 1500 [tpm]	Mogelijkheid tot aandrijven	Opdrachtgever	21-10-2019	Voldoet
8	Techniek	Eis	Tijdens een meting zal de luchtdruk elektronisch gemeten kunnen worden.	0 – 10 [barg]	Bereik betreffende instrument	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet
9	Techniek	Eis	Tijdens een meting zal het luchtverbruik elektronisch gemeten kunnen worden.	0 – 310 [NI/sec]	Bereik betreffende instrument	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet

10	Techniek	Eis	Tijdens een meting zal het toerental van de uitgaande as elektronisch gemeten kunnen worden.	0 – 2500 [tpm]	Bereik betreffende instrument	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet
11	Techniek	Wens	Tijdens een meting zal een hoger toerental van de uitgaande as elektronisch gemeten kunnen worden.	0 – 3500 [tpm]	Bereik betreffende instrument	Eigen	12-09-2019	Voldoet
12	Techniek	Eis	Tijdens een meting zal het aanwezige koppel op de uitgaande as elektronisch gemeten kunnen worden.	0 – 200 [Nm]	Bereik betreffende instrument	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet
13	Techniek	Eis	De elektronische meetwaarden van de gemeten specificaties tijdens een test zullen verzameld en omgezet kunnen worden tot gewenste eenheden.	[V/mA] → [barg] [V/mA] → [NI/sec] [V/mA] → [tpm] [V/mA] → [Nm]	Omzetbaarheid van signalen tot juiste parameters	Opdrachtgever	12-09-2019	Voldoet
14	Techniek	Eis	Het montagepunt voor de testmotoren moet sterk genoeg zijn om de grootste en zwaarste motor te ondersteunen (RM410 = 62 kg, bxhxl = 400x400x342 mm).	Ja / Nee	Niet optreden van plastische vervorming of bezwijking	Eigen	13-09-2019	Voldoet
15	Gebruik	Wens	Testmotoren moeten eenvoudig te monteren zijn.	Ja / Nee	Comfortabel te monteren	Eigen	13-09-2019	Confirmatie nodig uit de praktijk
16	Gebruik	Wens	Het montagepunt voor testmotoren moet eenvoudig te bereiken zijn.	Ja / Nee	Comfortabel te bereiken	Eigen	13-09-2019	Confirmatie nodig uit de praktijk
17	Gebruik	Wens	Instelbaarheden van de opstelling moeten eenvoudig aan te passen zijn.	Ja / Nee	Comfortabel in te stellen	Eigen	11-10-2019	Confirmatie nodig uit de praktijk
18	Techniek	Wens	De testmotoren worden gekoppeld aan de aanwezige 3-fase elektromotor (Sg160L-4: Nom. 15 kW; 1460 tpm; 98 Nm)	Ja / Nee	Elektromotor Sg160L-4 aanwezigheid	Opdrachtgever	16-09-2019	Voldoet

Betrouwbaarheid								
19	Techniek	Eis	Het totale elektronische meetresultaat van de testopstelling, met betrekking tot het vermogen, mag niet te veel afwijken ten opzichte van de realiteit.	$\pm 5\%$	Resultaten berekeningen gecombineerde meetafwijking vermogen	Opdrachtgever	16-09-2019	Voldoet
20	Techniek	Eis	Het totale elektronische meetresultaat van de testopstelling, met betrekking tot het rendement, mag niet te veel afwijken ten opzichte van de realiteit.	$\pm 5\%$	Resultaten berekeningen gecombineerde meetafwijking rendement	Opdrachtgever	21-10-2019	Voldoet
21	Techniek	Eis	De uitlijning tussen de testmotor en de krachtopnemer moet binnen bepaalde waarden blijven.	Axiaal: 2 [mm] Radiaal: 0,2 [mm] Hoek: 1 [°]	Resultaten berekeningen buiging en toleranties	Datasheet balg-koppeling BKL series	26-11-2019	Voldoet
Veiligheid								
22	Gebruik	Eis	Tussen draaiende onderdelen en de gebruiker van de opstelling moet een beschermende plaat gemonteerd worden.	Ja / Nee	Beschermende plaat aanwezigheid	Eigen	13-09-2019	Voldoet
23	Gebruik	Eis	In de toevoer moet een kraan aanwezig zijn om de toevoer van perslucht te onderbreken wanneer nodig.	Ja / Nee	Kraan aanwezigheid	Eigen	13-09-2019	Voldoet
24	Gebruik	Eis	Er moet een mogelijkheid zijn om een toepasbare uitlaat aan elke testmotor te monteren om het geluidsniveau te reduceren.	Ja / Nee	Demper aanwezigheid	Eigen	16-09-2019	Voldoet

3. Hoofd- en deelvragen

3.1 Hoofdvraag

Aan de hand van de probleem- en doelstelling wordt de volgende hoofdvraag geformuleerd:

Waar moet een meetopstelling aan voldoen om verschillende typen luchtmotoren uit het bedrijfsassortiment en een nieuw prototype te kunnen testen op basis van prestaties en verbruik met een bepaalde meetnauwkeurigheid?

3.2 Deelvragen

Om de hoofdvraag goed te kunnen beantwoorden zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. *Welke prestaties en eigenschappen moeten er gemeten worden?*
2. *Welke meetinstrumenten zijn beschikbaar voor de gewenste metingen?*
3. *Hoe kunnen sensoren geselecteerd worden op basis van nauwkeurigheid?*
4. *Welke motoren moeten getest kunnen worden?*
5. *Op welke manier kan gerealiseerd worden dat verschillende motoren getest kunnen worden?*
6. *Hoe kan een belasting gesimuleerd worden voor de testmotoren?*

3.3 Onderzoek

Het beantwoorden van de hoofdvraag, aldus de deelvragen, wordt behandeld aan de hand van verricht onderzoek. Zo is er onderzoek gedaan naar verschillende onderwerpen, namelijk:

- Meettechnieken en -componenten, zie Bijlage C.
- Krachtopnemers, zie Bijlage D.
- Sensor terminologie, inclusief benadering Total Error Band (TEB) en gecombineerde meetonzekerheid, zie Bijlage E.

Er is geen onderzoek gedaan naar strategieën voor het verzamelen en verwerken van de elektronische meetwaarden, aangezien dit buiten de projectgrenzen valt.

4. Analysefase

Om een nauwkeurige meetopstelling te kunnen maken welke op basis van meetresultaten elektronische signalen kan afgeven dienen sensoren toegepast te worden. Hiervoor zijn een hoop meettechnieken toepasbaar welke nader worden verklaard in het onderzoeksdocument in Bijlage C. Ook methodes om gegenereerde krachten van de testmotoren op te nemen, aldus het simuleren van een belasting, wordt behandeld in Bijlage D. Tot slot wordt in Bijlage E beschreven wat veelgebruikte termen binnen de sensortechniek betekenen en hoe de totale sensorafwijking bepaald kan worden. De verzamelde theorie dient als hulpmiddel bij het beantwoorden van de deelvragen en het maken van een componentenkeuze.

In dit hoofdstuk zullen de deelvragen beantwoord worden met behulp van onderzoeksresultaten. Ieder deelhoofdstuk zal één van de deelvragen behandelen aan de hand van deze resultaten. Tot slot dient de verzamelde theorie eveneens als hulpmiddel bij het doorlopen van het ontwerpproces.

4.1 Deelvraag 1

De deelvraag luidt: *Welke prestaties en eigenschappen moeten er gemeten worden?*

Om dit te kunnen beantwoorden is het van belang om te weten waarvoor luchtmotoren toegepast worden. Aan de hand van deze informatie kan bepaald worden welke informatie beschikbaar moet zijn en welke gegevens dus gewenst zijn om te meten.

4.1.1 Toepassingsgebied en gedrag van luchtmotoren

Luchtmotoren worden met name in industriële toepassingen ingeschakeld. Het voordeel is dat deze motoren op een mechanische wijze functioneren en geïntegreerd kunnen worden in pneumatische systemen. In omgevingen zoals de mijnbouw- of chemische industrie biedt dit een veilige manier wat betreft aandrijving aangezien dit explosiegevaarlijke omgevingen zijn. Elektro- en verbrandingsmotoren, eveneens als overige elektrische systemen zijn gevaarlijk om in dit soort omgevingen toe te passen.

Vaak worden luchtmotoren ingezet in installaties waarbij de motor vaak op en af onder druk wordt gezet, of constant onder druk staat. Dit wil zeggen dat de motor bijna altijd een constant toerental heeft, met als uitzondering (plotse) veranderingen van de belasting. De druk van de aangevoerde perslucht en de belasting van de motor zijn de grootste factoren voor de verandering van het toerental. In de meeste situaties zijn deze constant voor lange duur. Denk hierbij aan het aandrijven van een mengmachine voor vloeistoffen of een pompinstallatie.

Aan de hand van begrip voor de toepassingsgebieden en -situaties kan bepaald worden welke gegevens gewenst zijn om te weten van een motor. Het in kaart brengen van deze gegevens leidt tot de uiteindelijke meetdoeleinden van de beoogde testopstelling, wat wordt behandeld in paragraaf 4.1.2.

4.1.2 Meetdoeleinden

Voor de betreffende toepassingsgebieden is het gunstig om te weten welk koppel een luchtmotor kan leveren bij een bepaald toerental, inclusief de nodige luchtdruk. Om een kostenschatting te kunnen maken voor het energieverbruik van een dergelijke installatie zal ook gemeten moeten worden hoeveel massa lucht er verbruikt wordt per tijdseenheid. Aan de hand van het verschil tussen toegevoerde energie, berekend uit het debiet, en het geleverde vermogen kan ook het rendement bepaald worden.

Om een visuele weergave te creëren van de gemeten motorspecificaties kunnen deze gegevens in grafieken worden weergegeven. Welke grafieken uiteindelijk gemaakt zullen worden is afhankelijk van de tussenliggende relaties van de gegevens. Er kan gesteld worden dat:

- Het **toerental [n]** afhankelijk is van het te leveren **koppel [T]** en de **ingaaande druk [p]**.
- Het gegenereerde **koppel [T]** afhankelijk is van het **toerental [n]** en de **ingaaande druk [p]**.
- Het **vermogen [P]** afhankelijk is van het **toerental [n]**, het gegenereerde **koppel [T]** en de **ingaaande druk [p]**.
- Het **debiet [Q]** afhankelijk is van het **vermogen [P]** en de **ingaaande druk [p]**.

De basisgrafieken die hier uit geplot kunnen worden betreffen:

1. Verhouding tussen **koppel [T]** en **toerental [n]** voor de gewenste **ingaaande druk [p]**.
2. Verhouding tussen **vermogen [P]** en **toerental [n]** voor de gewenste **ingaaande druk [p]**.
3. Verhouding tussen **debiet [Q]** en **toerental [n]** voor de gewenste **ingaaande druk [p]**.
4. Verhouding tussen **rendement [η]** en **toerental [n]** voor de gewenste **ingaaande druk [p]**.

Voor de grafieken 1 tot en met 3 kan een voorbeeld worden gevonden in één van de datasheets van luchtmotoren uit het assortiment in Bijlage H. Aan de hand van de verhouding tussen het vermogen en debiet kan grafiek 4 gecreëerd worden, namelijk het resulterende rendement over een toerental bereik.

De specificaties die uiteindelijk gemeten moeten worden om deze grafieken te realiseren zijn:

- **Ingaande druk [p]**
- **Debiet [Q]**
- **Toerental [n]**
- **Koppel [T]**

4.2 Deelvraag 2

De deelvraag luidt: *Welke meetcomponenten zijn gebruikelijk voor de gewenste meettoepassingen?*

Er is onderzoek gedaan naar mogelijke meettechnieken voor de beoogde metingen. De resultaten van dit onderzoek worden op basis van werkingsprincipe behandeld in Bijlage C. Aan het eind van ieder onderwerp is een vergelijkingstabel opgesteld welke globaal een aantal keuzefactoren weergeeft met aanvullende opmerkingen. Aangezien de meeste informatie omtrent de specificaties van dergelijke meetcomponenten erg breed en overlappend kan zijn is dit niet leidend maar geeft dit inzicht en dient het als hulpmiddel bij het maken van een componentenkeuze.

Voor het elektronisch meten van de ingaande druk [p] voor de beoogde opstelling kunnen de volgende componenten toegepast worden, afkomstig uit het onderzoek in Bijlage C.1:

- **Gecombineerde manometer**
- **Druktransmitter**

Voor het elektronisch meten van het debiet [Q] voor de beoogde opstelling kunnen de volgende componenten toegepast worden, afkomstig uit het onderzoek in Bijlage C.2:

- **Verschildruk flowmeter**
- **Thermische flowmeter**
- **Coriolis massaflowmeter**
- **Vortex flowmeter**
- **Variable area flowmeter**
- **Turbine flowmeter**
- **Ultrasone flowmeter**

Voor het elektronisch meten van het toerental [n] voor de beoogde opstelling kunnen de volgende componenten toegepast worden, afkomstig uit het onderzoek in Bijlage C.3:

- **Infrarood sensor**
- **Inductieve nabijheid sensor**
- **Capacitieve nabijheid sensor**
- **Magnetische nabijheid sensor**
- **Incrementele encoder**

Voor het elektronisch meten van het koppel [T] voor de beoogde opstelling kunnen de volgende componenten toegepast worden, afkomstig uit het onderzoek in Bijlage C.4:

- **Krachtsensor (statisch)**
- **Reactie koppel sensor (statisch)**
- **Sleepring koppel sensor (dynamisch)**
- **Transformator koppel sensor (dynamisch)**
- **Telemetrie koppel sensor (dynamisch)**
- **Optische koppel sensor (dynamisch)**

4.3 Deelvraag 3

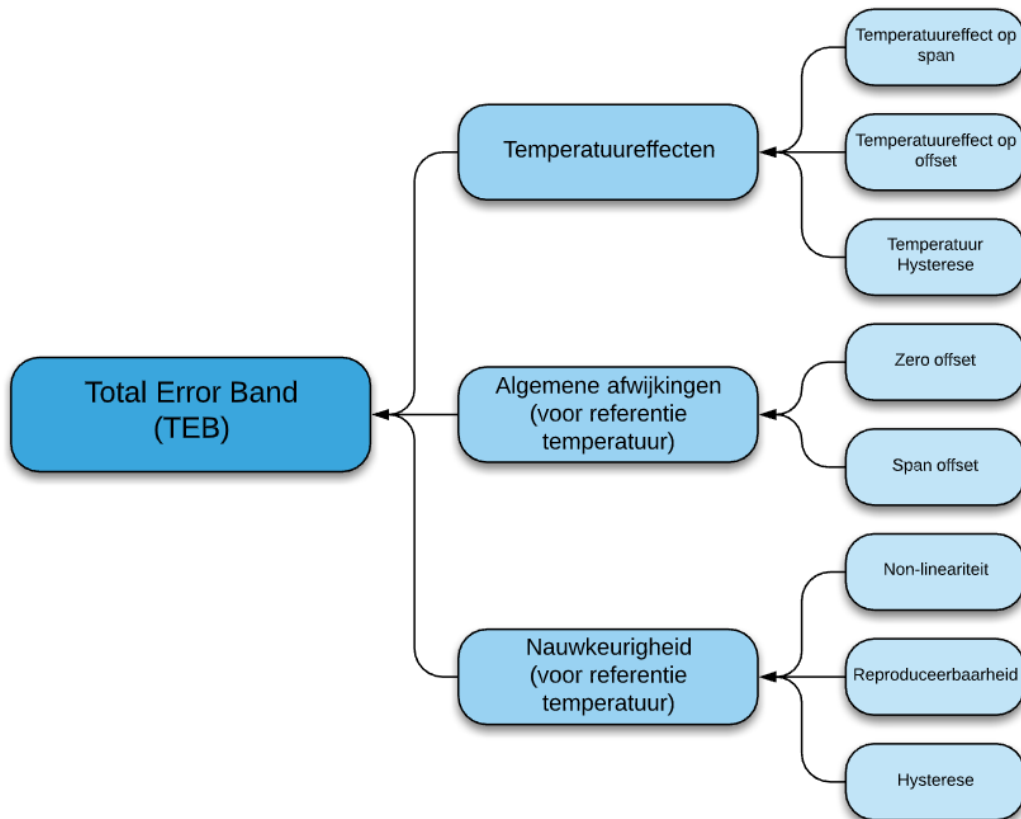
De deelvraag luidt: *Hoe kunnen sensoren geselecteerd worden op basis van nauwkeurigheid?*

Voor het selecteren van de juiste sensor is het van belang dat begrepen wordt wat er in de datasheets van de desbetreffende producenten wordt getoond. De termen en gegevens die hier aan bod komen kunnen per producent veel afwijken, eveneens als de aanpak die wordt toegepast om een (gedeeltelijke) nauwkeurigheid aan te geven.

4.3.1 Sensorgegevens interpreteren

In Bijlage E worden onderzoeksresultaten weergegeven omtrent terminologie rond sensoren. Tot slot wordt behandeld hoe de algehele nauwkeurigheid van een sensor in de beoogde toepassing berekend kan worden. Dit wordt in het algemeen voor sensoren de Total Error Band (TEB) genoemd en bestaat uit een aantal gegevens die in een datasheet worden gegeven.

In figuur 1 wordt getoond uit welke deelspecificaties de TEB is opgebouwd. Deze worden grotendeels los gegeven in de datasheet van een sensor. Het is mogelijk dat de nauwkeurigheid (bestaande uit non-lineariteit, reproduceerbaarheid en hysteresis) als één geheel wordt gegeven. Er moet wel rekening gehouden worden met het feit dat deze nauwkeurigheid en de algemene afwijkingen gelden bij een referentie temperatuur. Wanneer het toepassingsgebied een afwijkende temperatuur of doorgaande temperatuurveranderingen betreft moeten de temperatuureffecten worden meegenomen. Deze hebben over het algemeen ook het grootste effect op de algehele nauwkeurigheid van een sensor.



Figuur 1: Alle sensorspecificaties welke effect hebben op de maximaal mogelijke meetafwijking van een sensor.

4.3.2 Bepalen van nauwkeurigheid

De specificaties die benodigd zijn, aldus gemeten moeten worden, zullen grotendeels van elkaar afhangen. Ten voorbeeld wordt een motor genomen die in dit geval 2000 toeren per minuut (tpm) zal draaien op 4 barg ingaande luchtdruk. Wanneer het meetinstrument voor het toerental volledig accuraat kan meten, maar de druksensor een ingaande luchtdruk aangeeft van 4,2 barg zullen de gegevens in verhouding met elkaar niet kloppen. Ditzelfde principe geldt voor alle behandelde specificaties in paragraaf 4.1.2.

Hierom zal de nauwkeurigheid van één of twee sensoren niet van belang zijn, maar eerder de nauwkeurigheid van het gehele systeem. Alle mogelijk optredende afwijkingen, waarvan de gegevens samengevoegd moeten worden, moeten gecombineerd worden. Dit resulteert in een gecombineerde meetafwijking of -onzekerheid. De methode die toegepast kan worden om de gecombineerde meetonzekerheid te benaderen wordt behandeld in Bijlage E.2.

4.4 Deelvraag 4

De deelvraag luidt: *Welke motoren zullen getest kunnen worden?*

De meetopstelling zal motoren kunnen testen met een vermogensbereik van 5 tot 15 kW. Informatie betreffend de maximale specificaties van de motoren uit het assortiment die binnen deze grenzen vallen worden weergegeven in tabel 4.1, afkomstig uit de datasheets welke worden getoond in Bijlage H. Voor dimensies van de desbetreffende motoren kunnen deze zelfde datasheets worden ingezien.

Tabel 4.1: Algemene specificaties van motoren uit het assortiment welke binnen het bereik vallen van de beoogde testopstelling.

Motoren uit het assortiment (5 – 15 kW)					
Basismodel	Modelvarianten	Max. Vermogen [kW]	Max. Toerental [rpm]	Max. Koppel / Startkoppel [Nm]	Max. luchtverbruik [l/sec]
Vaanmotoren op 7 bar					
V8	VA8C / VA8J /	5,4	3000	22 / 31	115
V10	VA10C / VA10J /	9,5	2400	43,5 / 48	148
V12	VA12C / VS12C	14	1800	87 / 104	310
Zuigermotoren op 8 bar					
RM310	RM310	7,5	2400	55 / 65	200
RM410	RM410	14	2000	150 / 190	305

Het wordt geschat dat het nieuwe prototype een vermogen van rond de 10 kW zal bevatten en een maximaal toerental kan draaien van 2000 tpm. De dimensies van de motor worden weergegeven in Bijlage H.1.

4.5 Deelvraag 5

De deelvraag luidt: *Op welke manier kan gerealiseerd worden dat verschillende motoren getest kunnen worden?*

Het is beoogd om meerdere type luchtmotoren, met als prioriteit het nieuwe prototype luchtmotor, te kunnen testen op de gewenste opstelling. De motoren zullen verschillen in bouw- en aansluitmaten en moeten uiteindelijk gemonteerd kunnen worden op de test aansluiting. De verschillen tussen deze testmotoren, inclusief het prototype, zullen zijn:

- **Bouwmaat;** De bouwmaten van de motoren verschillen ten opzichte van elkaar. Ook zijn er opties met en zonder voetsteunen.
- **Flensmaat;** De meeste motoren die getest zullen worden hebben flensmaten volgens zowel IEC als NEMA. Over het algemeen zal altijd een motorvariant met een flensmaat volgens IEC verkozen worden. Het is mogelijk dat er motoren getest dienen te worden met een flensmaat volgens NEMA, of speciaal aangepast.
- **As diameter / lengte;** Ook voor de uitgaande assen geldt dat deze gedimensioneerd zijn volgens zowel IEC als NEMA, en dat er vrijwel altijd getest zal worden met maten volgens IEC. Het is mogelijk dat er motoren getest dienen te worden met een asmaat volgens NEMA, of speciaal aangepast.
- **Aansluitmaat luchttoevoer;** De motoren met bouwmaten volgens IEC bevatten gasdraad volgens BSP, en de NEMA varianten gasdraad volgens NPT. Over het algemeen zullen motoren getest worden met bouwmaten volgens IEC, aldus aansluitmaten volgens BSP. Het is mogelijk dat er motoren getest dienen te worden met een aansluitmaat volgens NPT.

Voor de exacte maatverschillen tussen alle testmotoren kunnen de datasheets in Bijlage H geraadpleegd worden.

Om de verschillende motoren op dezelfde testopstelling te kunnen monteren zullen er instelmogelijkheden beschikbaar moeten zijn. Mogelijke oplossingen voor de verschillende factoren zijn:

- **Bouwmaat;** Genoeg ruimte voor het monteren van de grootste motor zodat deze niet in de weg komt te zitten van overige componenten. Wanneer voetsteunen gebruikt worden zal het van belang zijn dat de hoogte instelbaar is om de uitgaande as van de motor te kunnen centreren.
- **Flensmaat;** Wanneer een flensmontage toegepast wordt zullen er verloopflenzen tussen de testmotoren en het montagepunt geplaatst moeten worden. Eventueel kan voor meerdere flensmaten een universele verloopflens ontworpen worden.
- **As diameter / lengte;** Om de as te koppelen aan de krachtopnemer zullen koppelingen worden toegepast. Deze componenten zijn passend op een as met een bepaalde diameter. Wanneer verschillende as diameters aan bod komen kan er gewerkt worden met een set verschillende maten van koppelingen of met as bussen. Om een lengteverschil te overbruggen moet het montagepunt van de testmotoren of krachtopnemer in de lengte instelbaar zijn.
- **Aansluitmaat luchttoevoer;** Elke motor heeft een andere aansluitmaat voor de luchttoevoer. Een universeel aansluitpunt of een set met koppelstukken kan er voor zorgen dat de luchttoevoer aan iedere motor aangesloten kan worden.

4.6 Deelvraag 6

De vraag luidt: *Hoe kan een belasting gesimuleerd worden voor de testmotoren?*

De testmotoren zullen een kracht uitoefenen welke in verschillende mate moet worden geabsorbeerd door middel van het beoefenen van een tegenkoppel. In Bijlage D wordt een onderzoeksdocument weergegeven over de werkingsprincipes van een aantal toepasbare krachtopnemers met betrekking tot deze functie. Aan het eind van het hoofdstuk is een vergelijkingstabel opgesteld welke globaal een aantal keuzefactoren weergeeft met aanvullende opmerkingen.

Mogelijk toepasbare systemen als krachtopnemer, afkomstig uit het onderzoek in Bijlage D, zijn:

- **Elektromotor**
- **Luchtmotor**
- **Hydraulische pomp**
- **Mechanische rem**
- **Poederrem**
- **Hysterese rem**
- **Eddy-current rem**

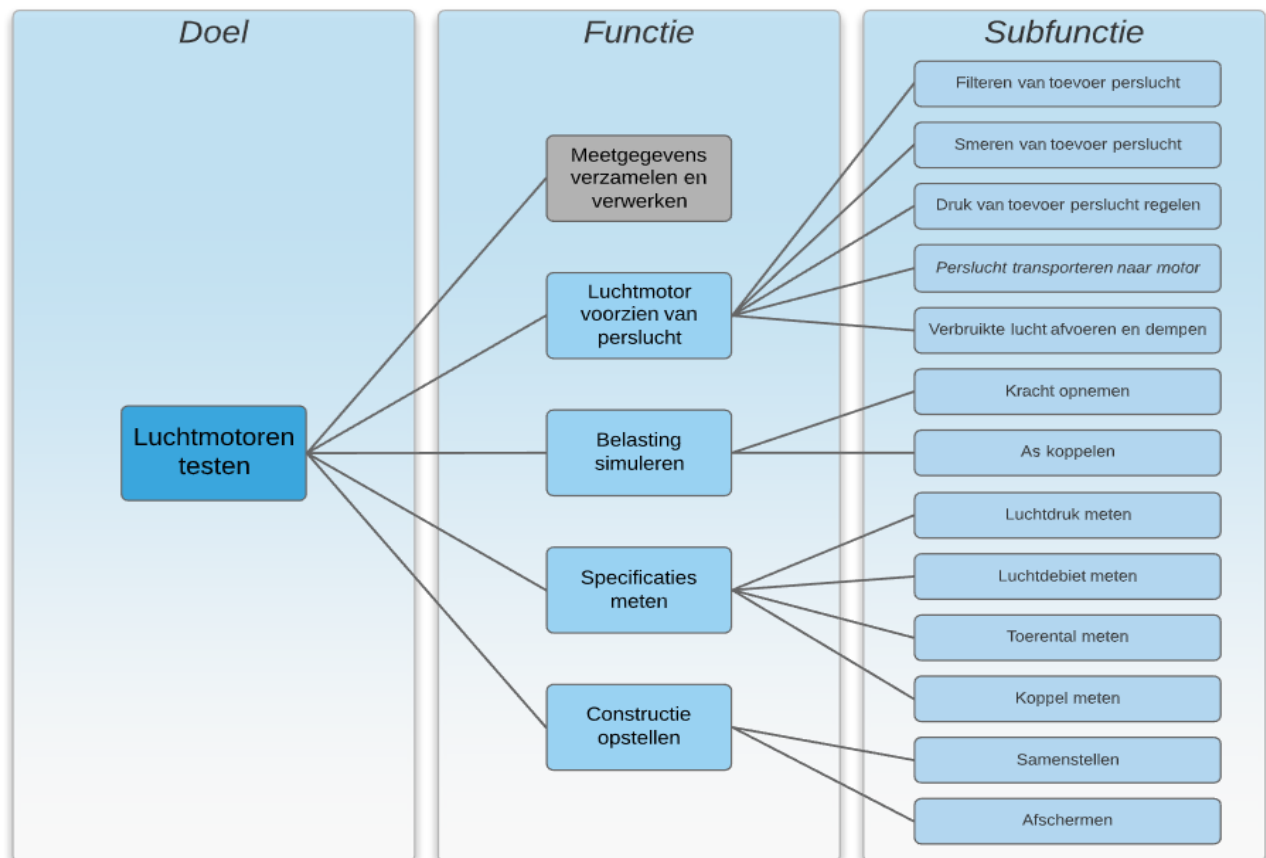
5. Conceptuele fase

Tijdens de conceptuele fase worden concepten gegenereerd op basis van de vergaarde kennis uit de verschillende onderzoeken en de eisen van het product. Door middel van de concepten tegen elkaar af te wegen aan de hand van weegfactoren kan geschat worden hoe ieder concept ten opzichte van elkaar zal functioneren in het beoogde toepassingsgebied. Mogelijk kan een combinatie van verschillende delen uit de concepten tot een definitief eindconcept leiden.

5.1 Functieanalyse

Om een beter inzicht te krijgen over de functies die vervuld moeten worden is een functieanalyse gemaakt, zie figuur 2. Er wordt onderscheid gemaakt tussen het algemene doel, functies en deelfuncties. De deelfuncties zullen meegenomen worden in het morfologisch overzicht in hoofdstuk 5.2.

De functie 'meetgegevens verzamelen en verwerken' is ter illustratie meegenomen in de functieanalyse. Zoals in de afbakening in hoofdstuk 2.3 is beschreven zullen alleen de eisen van de dataverwerking worden behandeld, en niet de werking.

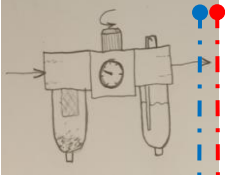
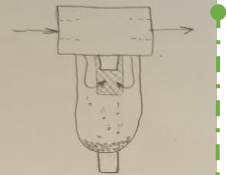
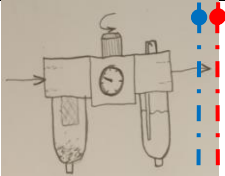
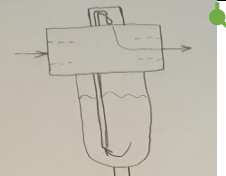
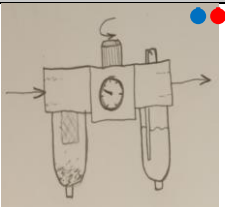
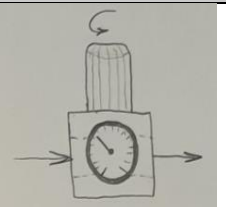
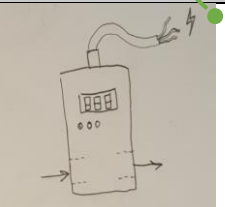


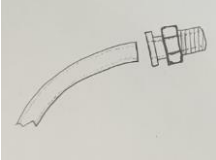
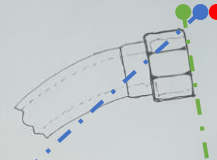
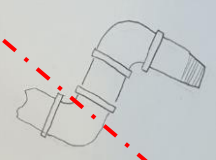
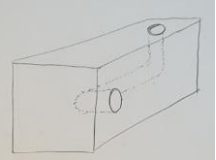
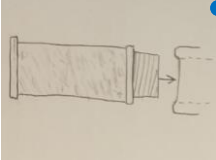
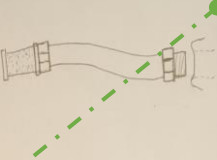
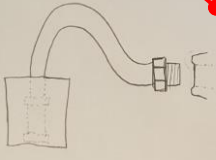
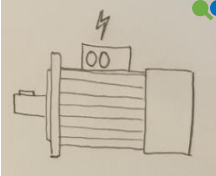
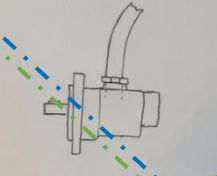
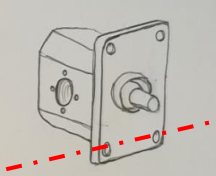
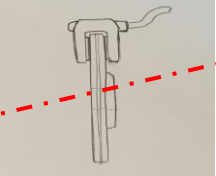
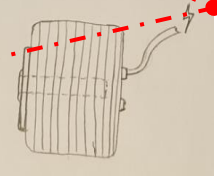
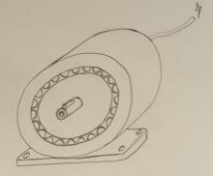
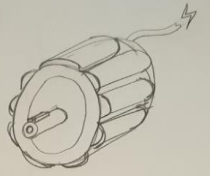
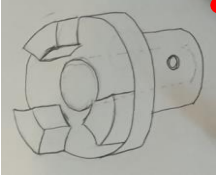
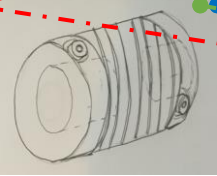
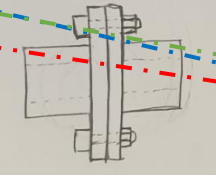
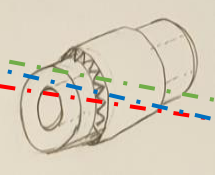
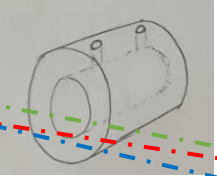
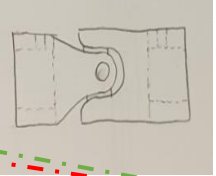
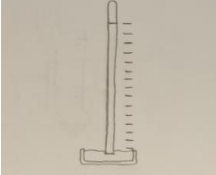
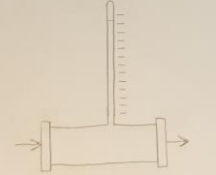
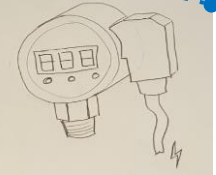
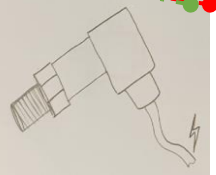
Figuur 2: Functieanalyse van de beoogde meetopstelling. Verzameling en verwerking van data wordt niet behandeld.

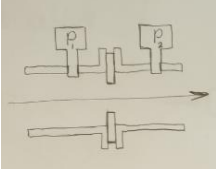
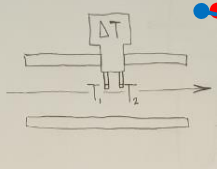
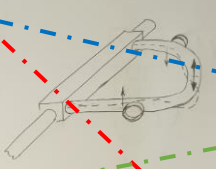
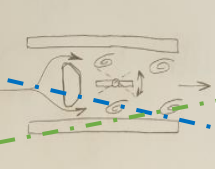
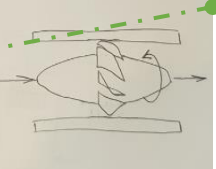
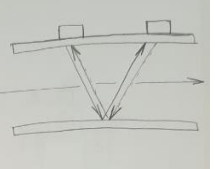
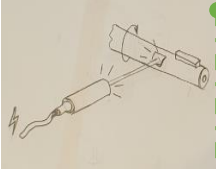
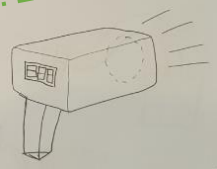
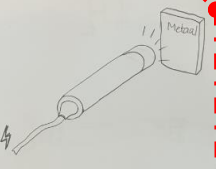
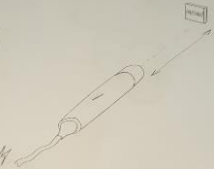
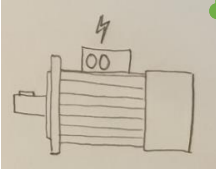
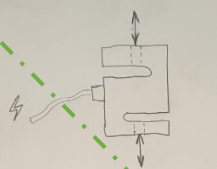
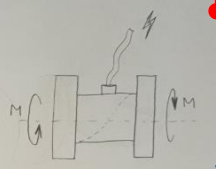
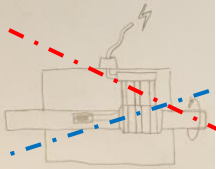
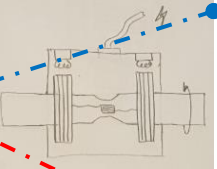
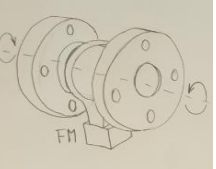
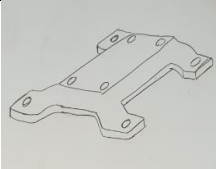
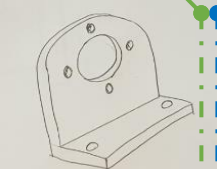
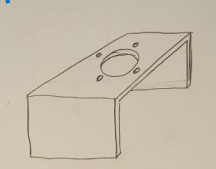
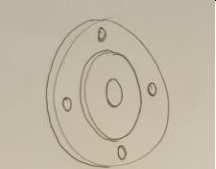
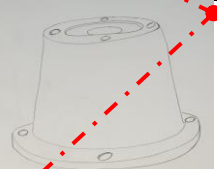
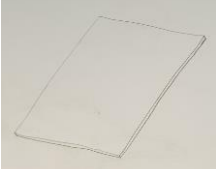
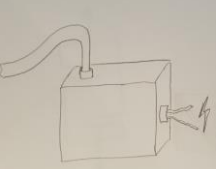
5.2 Morfologisch overzicht

In tabel 5.1 worden de te vervullen deelfuncties onder elkaar gezet, waar achter de functievervullers worden weergegeven. Deze deelfuncties zijn bepaald door middel van de functieanalyse in deelhoofdstuk 5.1. De functievervullers zijn afkomstig van het onderzoek naar meettechnieken en krachtopnemers uit Bijlage C en D, eveneens als algemene kennis van luchtbehandeling, aandrijvingen en overige componenten.

Tabel 5.1: Morfologisch overzicht; functievervullers worden weergegeven per deelfunctie van het beoogde ontwerp. Concepten 1, 2, 3 zijn respectievelijk gekleurd in rood, blauw en groen.

Deelfuncties	Functievervullers						
	1	2	3	4	5	6	7
Lucht filteren	FRL-unit	Persluchtfilter					
							
Lucht smeren	FRL-unit	Olie vernevelaar					
							
Luchtdruk regelen	FRL-unit	Drukregelaar	Elek. drukregelaar				
							

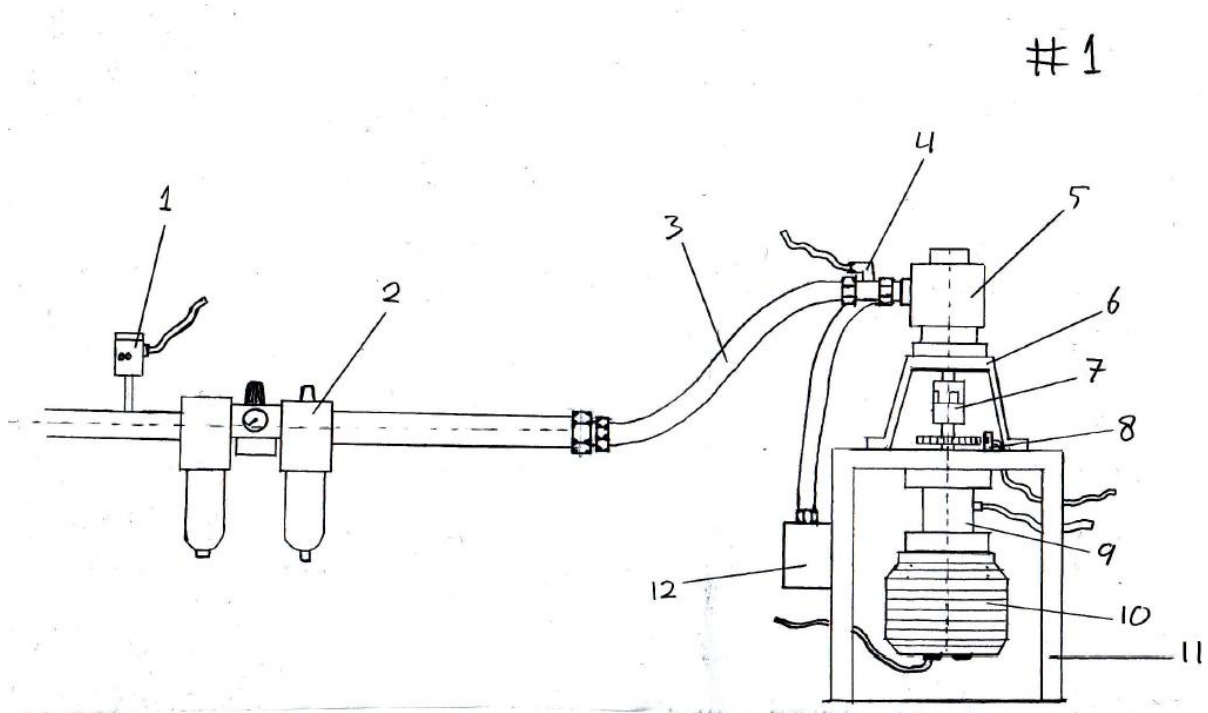
Luchttransport aansluiten	<i>Kunststof buis</i> 	<i>Gevlochten slang</i> 	<i>Pijp</i> 	<i>Intern</i> 			
Lucht afvoeren en geluid dempen	<i>Uitlaat (direct)</i> 	<i>Uitlaat (afstand)</i> 	<i>Uitlaat (gesloten)</i> 				
Kracht opnemen	<i>Elektromotor</i> 	<i>Luchtmotor</i> 	<i>Hydrauliek pomp</i> 	<i>Mechanische rem</i> 	<i>Poederrem</i> 	<i>Hysteresis rem</i> 	<i>Eddy-current rem</i> 
As koppelen	<i>Klauwkoppeling</i> 	<i>Balgkoppeling</i> 	<i>Lamellenkop.</i> 	<i>Tandkoppeling</i> 	<i>Starre koppeling</i> 	<i>Kruiskoppeling</i> 	
Luchtdruk meten	<i>Torricellian baro.</i> 	<i>Aneroid baro.</i> 	<i>Analog mano.</i> 	<i>Ind. analog mano.</i> 	<i>Digitale mano.</i> 	<i>Combi-mano.</i> 	<i>Druktransmitter</i> 

Luchtdebiet meten	<i>Verschildruk fm.</i> 	<i>Thermische fm.</i> 	<i>Coriolis flowm.</i> 	<i>Vortex flowmeter</i> 	<i>VA flowmeter</i> 	<i>Turbine flowm.</i> 	<i>Ultrasonen flowm.</i> 
Toerental meten	<i>Infrarood sensor</i> 	<i>Stroboscoop</i> 	<i>Inductie sensor</i> 	<i>Capacitieve sens.</i> 	<i>Magneet sensor</i> 	<i>Incrementele enc.</i> 	
Koppel meten	<i>Elektromotor</i> 	<i>Krachtsensor</i> 	<i>Reactie sensor</i> 	<i>Sleepring sensor</i> 	<i>Transform. sensor</i> 	<i>Telemetrie sensor</i> 	<i>Optische sensor</i> 
Samenstellen	<i>Voetsteun</i> 	<i>L-motorbeugel</i> 	<i>U-motorbeugel</i> 	<i>Flens</i> 	<i>Lantaarnstuk</i> 		
Afschermen	<i>Plaatmateriaal</i> 	<i>Doorzichtige kap</i> 	<i>Dichte behuizing</i> 	<i>Lantaarnstuk</i> 			

5.3 Concepten

5.3.1 Concept 1

Het eerste concept betreft een opstelling waarbij de testmotor verticaal bovenop een lantaarnstuk gemonteerd kan worden, zie figuur 3. Door de verticale opstelling zal de krachtopnemer niet ondersteund hoeven te worden tegen het eigen gewicht, eveneens als dat een testmotor eenvoudig gepositioneerd kan worden.



Figuur 3: Geschetste weergave van concept 1. De genummerde componenten worden behandeld in tabel 5.2.

De nummers in de geschetste weergave van concept 3 corresponderen met de functievervullers in tabel 5.2.

Tabel 5.2: Functievervullers van concept 1. De componenten die worden behandeld zijn afkomstig uit de geschetste weergave in figuur 3.

Nr.	Functie	Functievervuller
1	Lucht massastroom meten	Thermische debietmeter
2	Lucht filteren/smeren/regelen	FRL-unit
3	Luchttransport aansluiten	Gevlochten slang
4	Luchtdruk meten	Druksensor
5	Motor testen	Testmotor
6	Samenstellen/afschermen	Lantaarnstuk
7	As koppelen	Klauwkoppeling
8	Toerental meten	Inductie sensor
9	Koppel meten	Reactie koppelsensor
10	Kracht opnemen	Poederrem
11	Samenstellen	U-motorbeugel
12	Lucht afvoeren en geluid dempen	Demper (afstand)

De lucht komt van de compressor aan in een nabijgelegen pijp waar allereerst de massastroom gemeten kan worden met behulp van een thermische debietmeter. Deze is voor de FRL-unit geplaatst zodat er nog geen olie aanwezig is in de stroming wat een thermische sensor kan verhinderen om een goed meetresultaat te verkrijgen. Na de debietmeter wordt de lucht gefilterd, gesmeerd en geregeld in een FRL-unit. De luchtdruk sensor bevindt zich zo dicht mogelijk bij de motor zodat de ingaande stroom goed afgesteld kan worden met betrekking tot drukverliezen. De luchttoevoer wordt gekoppeld met een gevlochten slang aangezien deze in grotere maten te verkrijgen zijn dan kunststof buizen. Overigens komen de interne diameters van gevlochten slangen goed overeen met de aansluitdimensies van de testmotoren. De af te voeren lucht wordt getransporteerd naar een demper welke zich bevindt in een gedempte container.

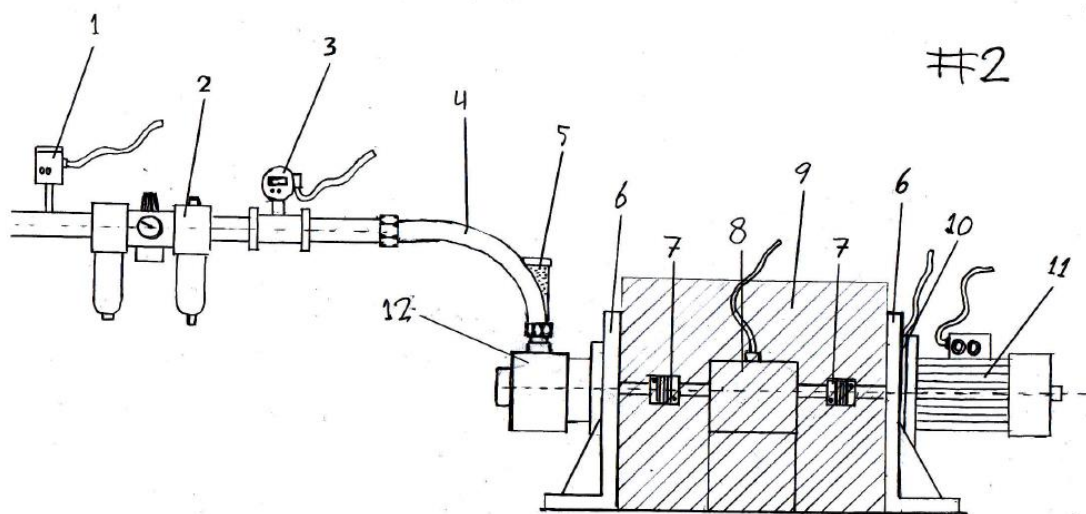
Gegenereerde krachten van de testmotor worden opgevangen door een magnetische poederrem, welke erg nauwkeurig een tegenkoppel kan genereren, ook bij stilstand. Deze poederrem zal bij aanvang van een test een groot genoeg tegenkoppel leveren waardoor de testmotor bij volledige werkdruk in stilstand is. Dit tegenkoppel neemt geleidelijk af tot de testmotor het gewenste toerental heeft bereikt. Het reactiekoppel in de behuizing van de poederrem wordt opgevangen in de statische reactie koppelsensor.

De testmotor geeft zijn kracht af over een klauwkoppeling naar de poederrem. De klauwkoppeling compenseert voor eventuele uitlijn fouten. In het geval van een toerental/koppel curve creëren zal het niet uitmaken dan dit type koppelingen kunnen schokken dankzij terugslag bij snel starten en stoppen, aangezien tijdens het testen de tegenwerkende kracht geleidelijk afneemt. Om de aandrijving bevindt zich een lantaarnstuk wat ten goede komt van de uitlijning en de veiligheid.

Tot slot is er een tandwiel verbonden aan de as van de poederrem. Een inductieve nabijheid sensor staat gericht op de tanden van het tandwiel wat de aanwezigheid van langskomende tanden kan omzetten in pulsen. Deze pulsen worden vervolgens omgezet in een afleesbaar toerental.

5.3.2 Concept 2

Het tweede concept betreft een horizontale opstelling waarbij de krachtopnemer en testmotoren gemonteerd worden op L-motorbeugels. Een weergave van concept 2 wordt weergegeven in figuur 4. Het voordeel van een horizontale opstelling is dat het eenvoudig samen te stellen is en dat er eventueel meer of minder afstand gecreëerd kan worden door het verschuiven van de montagebeugel voor de testmotor.



Figuur 4: Geschetste weergave van concept 2. De genummerde componenten worden behandeld in tabel 5.3.

De nummers in de geschetste weergave van concept 3 corresponderen met de functievervullers in tabel 5.3.

Tabel 5.3: Functievervullers van concept 2. De componenten die worden behandeld zijn afkomstig uit de geschetste weergave in figuur 4.

Nr.	Functie	Functievervuller
1	Lucht massastroom meten	Thermische debietmeter
2	Lucht filteren/smeren/regelen	FRL-unit
3	Luchtdruk meten	Combi manometer
4	Luchttransport aansluiten	Gevlochten slang
5	Lucht afvoeren en geluid dempen	Demper (direct)
6	Samenstellen	L-motorbeugel
7	As koppelen	Balgkoppeling
8	Koppel meten	Transformator koppelsensor
9	Afschermen	Doorzichtige kap
10	Toerental meten	Incrementele encoder (flens)
11	Kracht opnemen	Elektromotor
12	Motor testen	Testmotor

De lucht zal in dit concept ook van de compressor aangevoerd worden in een nabijgelegen pijp waar allereerst het debiet wordt gemeten. Vervolgens wordt de lucht gefilterd, gesmeerd en geregeld in een FRL-unit waarna de luchtdruk wordt gemeten in een gecombineerde manometer. De luchtdruk is direct van de manometer af te lezen, terwijl er ook een elektronisch signaal afgegeven wordt. Direct na de drukmeter zal de lucht door een gevlochten slang getransporteerd worden naar de testmotor, wat kan leiden tot een klein drukverlies. Echter is de druksensor minder gevoelig voor schade dan bij concept 1 wanneer deze niet voor elke testmotor aan- en afgekoppeld hoeft te worden.

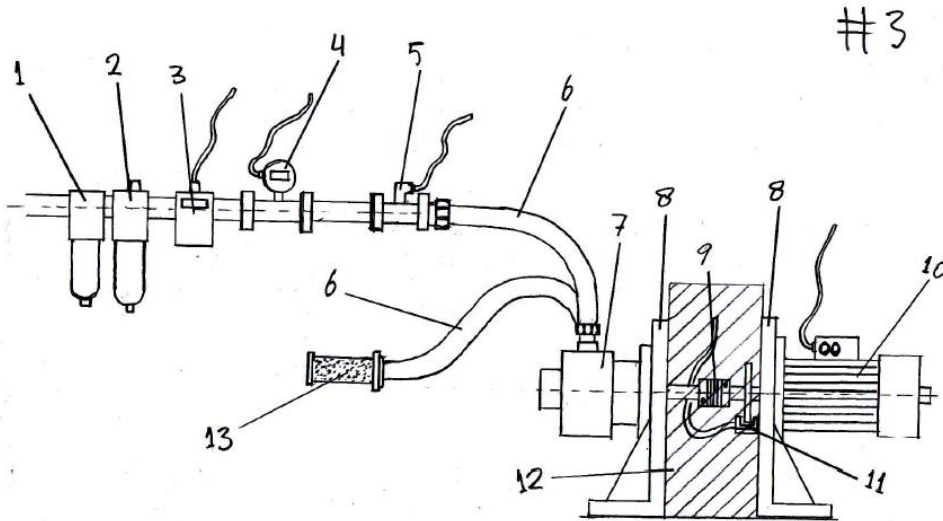
Het koppel van de testmotor wordt via balgkoppelingen en een dynamische transformator koppelsensor naar een elektromotor overgebracht. Deze elektromotor is al aanwezig en wordt hier voor beoogd te gebruiken. De elektromotor is goed te regelen en kan een tegenkoppel genereren vanaf stilstand tot een bepaald toerental. Het koppel dat wordt overgedragen wordt gemeten door een dynamische koppelsensor in de aandrijflijn. Dankzij een signaaloverdracht door middel van transformatoren vindt er geen weerstand plaats in de sensor en is deze zo goed als onderhoudsvrij.

De uitgaande assen worden met behulp van balgkoppelingen verbonden. Deze koppelingen kunnen grote uitlijnfouten opvangen, welke aanwezig zullen zijn dankzij de complexiteit van het exact dimensioneren van motorbeugels en de ondersteuning voor de koppelsensor. Ook dempen balgkoppelingen schokken en axiale krachten, waarvoor de koppelsensor gevoelig kan zijn. Bovendien kunnen deze ongewenste krachten voor meetafwijkingen zorgen.

Het toerental wordt gemeten met behulp van een incrementele encoder in flensformaat welke zich bevindt tussen de motorbeugel en de elektromotor. Dankzij een magneetring welke om de as wordt geplaatst in de flens kan een accuraat toerental gemeten worden.

5.3.3 Concept 3

Het derde, en laatste, concept betreft een eenvoudige opstelling waarbij de elektromotor de kracht opneemt en het koppel meet van de testmotor. Zoals te zien in figuur 5 betreft het een horizontale opstelling waarbij de enige toevoeging in de aandrijflijn een sensor is voor het meten van het toerental. Ook bij dit concept kan eventueel meer of minder afstand gecreëerd worden tussen de test- en elektromotor door middel van het verschuiven van de motorbeugel(s).



Figuur 5: Geschetste weergave van concept 3. De genummerde componenten worden behandeld in tabel 5.4.

De nummers in de geschetste weergave van concept 3 corresponderen met de functievervullers in tabel 5.4.

Tabel 5.4: Functievervullers van concept 3. De componenten die worden behandeld zijn afkomstig uit de geschetste weergave in figuur 5.

Nr.	Functie	Functievervuller
1	Lucht filteren	Air filter
2	Lucht smeren	Air lubricator
3	Luchtdruk regelen	Elektronische drukregelaar
4	Luchtdebiet meten	Turbine flowmeter
5	Luchtdruk meten	Druksensor
6	Luchttransport aansluiten	Gevlochten slang
7	Motor testen	Testmotor
8	Samenstellen	L-motorbeugel
9	As koppelen	Balgkoppeling
10	Kracht opnemen/koppel meten	Elektromotor
11	Toerental meten	IR-sensor
12	Afschermen	Doorzichtige kap
13	Lucht afvoeren en geluid dempen	Demper (afstand)

De lucht wordt ook in dit geval aangevoerd vanaf de compressor tot een nabijgelegen pijp waarna het gefilterd en gesmeerd wordt binnen twee losse componenten. Vervolgens zal de luchtdruk geregeld kunnen worden met behulp van een elektronische drukregelaar. Dit kan compenseren voor een eventuele drukverlaging tijdens het testen. Vervolgens zal aan het eind van de pijp een druktransmitter aangesloten zijn die de ingaande druk voor de testmotor kan meten. De uitgaande lucht zal getransporteerd worden naar een demper op afstand.

De testmotor wordt dankzij een balgkoppeling direct aangesloten aan de aanwezige elektromotor welke de kracht opneemt en met behulp van het meten van de elektronische parameters, het toerental en kennis van het rendement het aanwezige koppel kan meten. Dit is een complexere methode om succesvol een accuraat koppel te meten, maar biedt een eenvoudige opstelling wanneer goed geïmplementeerd.

Binnen de aandrijving bevindt zich een enkele balgkoppeling die kan compenseren voor uitlijnfouten en eventuele schokken kan dempen. Aan de uitgaande as van de elektromotor bevindt zich een schijf met uitsparingen welke gedetecteerd kunnen worden met behulp van een IR-sensor. De langskomende uitsparingen worden dankzij de sensor vertaald naar pulsen welke verder verwerkt kunnen worden tot een leesbaar toerental.

5.4 Kesselring methode

5.4.1 Weegfactoren

Voor het kiezen van een definitief concept worden de gemaakte concepten afgewogen. Om de concepten af te kunnen wegen zijn er op basis van het Programma van Eisen in deelhoofdstuk 2.4 criteria opgesteld welke verschillende weegfactoren hebben. Aan de hand van deze criteria kan het beste concept worden gekozen of eventueel samengesteld.

In tabel 5.5 worden eerst de criteria ten opzichte van elkaar afgewogen om hier een weegfactor aan te kunnen verbinden. In de horizontale rijen worden de af te wegen criteria beoordeeld ten opzichte van de criteria in de verticale kolommen. De punten worden vervolgens opgeteld en vormen de wegingsfactor.

De volgende criteria worden ten opzichte van elkaar afgewogen:

Functionele aspecten

1. Gecombineerde meetnauwkeurigheid vermogen (luchtdruk, toerental en koppel)
2. Gecombineerde meetnauwkeurigheid rendement (luchtdruk, debiet en toerental)
3. Bereik voor tegenkoppel (meetbaarheid en toegestane max.)
4. Bereik voor toerental (meetbaarheid en toegestane max.)
5. Veiligheid (afstand demper, beschermplaat, e.d.)
6. Gebruikscomfort (montage testmotoren, instelbaarheden, e.d.)

Fabricage aspecten

7. Prijs
8. Stabiliteit (constructie, onderhoudsgevoeligheid, e.d.)
9. Complexiteit productieonderdelen (nauwkeurigheid, uitlijning, e.d.)
10. Hoeveelheid onderdelen

Tabel 5.5: Bepaling van een weegfactor per criteria in de horizontale lijnen. (0 = 'minder belangrijk dan', 0,5 = 'even belangrijk' en 1 = 'belangrijker dan'.

Weegfactoren bepalen											
Criteria	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Totaal
1.		0,5	1	1	0,5	1	0,5	1	1	1	7,5
2.	0,5		1	1	0,5	1	0,5	1	1	1	7,5
3.	0	0		0,5	0	1	0,5	0,5	1	1	4,5
4.	0	0	0,5		0	1	0,5	0,5	1	1	4,5
5.	0,5	0,5	1	1		1	0,5	1	1	1	7,5
6.	0	0	0	0	0		0	0	0,5	1	1,5
7.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1		1	1	1	6,5
8.	0	0	0,5	0,5	0	1	0		1	1	4
9.	0	0	0	0	0	0,5	0	0		1	1,5
10.	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0

5.4.2 Keuzematrix concepten

Nu de criteria met bijbehorende weegfactoren bekend zijn kunnen de concepten ten opzichte van elkaar afgewogen worden. Met behulp van de uiteindelijke puntentelling wordt overzichtelijk welk concept het meest zal voldoen aan de gestelde eisen. Hierna wordt bepaald of één van de concepten verder uitgewerkt wordt of dat er een samenstelling van meerdere concepten gecreëerd wordt.

Tabel 5.6: Puntentelling per concept. Voor ieder criterium kan een score gegeven worden van 1 t/m 3, waarvan een bepaalde score niet twee keer toegekend mag worden.

Concepten puntentelling toekennen							
Criteria	Weegfactor	Concept 1		Concept 2		Concept 3	
		Punten	Incl. weging	Punten	Incl. weging	Punten	Incl. weging
1.	7,5	2	15	3	22,5	1	7,5
2.	7,5	2	15	1	7,5	3	22,5
3.	4,5	3	13,5	2	9	1	4,5
4.	4,5	3	13,5	1	4,5	2	9
5.	7,5	3	22,5	1	7,5	2	15
6.	1,5	1	1,5	2	3	3	4,5
7.	6,5	1	6,5	2	13	3	19,5
8.	4	2	8	1	4	3	12
9.	1,5	1	1,5	2	3	3	4,5
10.	0	1	0	2	0	3	0
Totaal punten incl. weging:							
Max. = 135 (100%)		97 (71,9%)		74 (54,8%)		99 (73,3%)	

5.4.3 Conceptevaluatie

Zoals weergegeven in tabel 5.6 heeft concept 3 de hoogste totaalscore behaald, waarna concept 1 en tot slot 2 volgen. Er is gekozen voor het creëren van een samengesteld eindconcept op basis van de behaalde score per criterium, positieve aspecten van ieder concept en aanvullende informatie en wensen, afkomstig van het bespreken van de concepten en resultaten met de bedrijfsbegeleider. Dit eindconcept wordt toegelicht in deelhoofdstuk 5.5.

5.5 Definitief concept

Aan de hand van het bespreken van de resultaten uit de keuzematrix en de concepten in het algemeen zijn er een aantal opmerkingen welke meegenomen worden in een nieuw definitief concept.

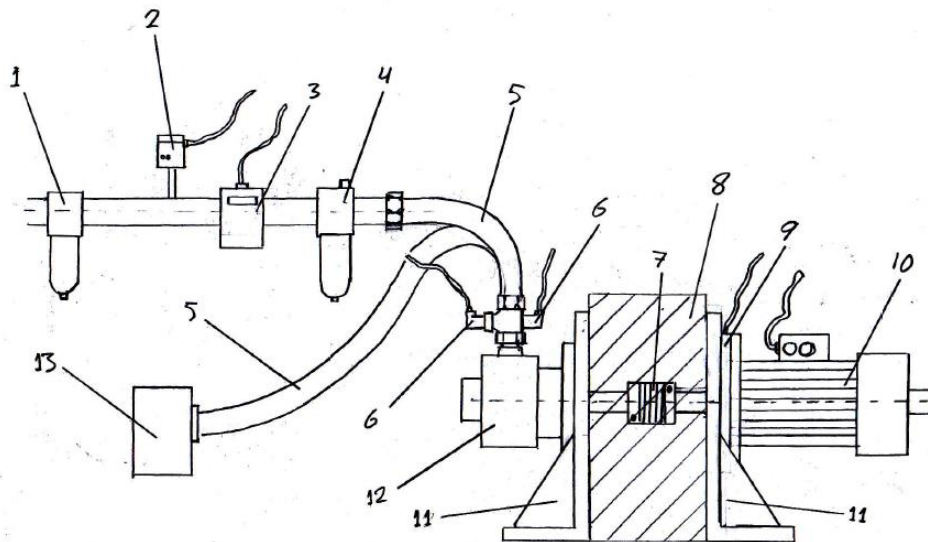
5.5.1 Aanvullingen en aanpassingen

Opmerkingen en/of toevoegingen met betrekking tot de concepten:

- Druksensor voor de ingaande luchtstroom moet zich zo dicht mogelijk bij de testmotor bevinden. Deze zal dus aanwezig zijn rond het aansluitpunt van de luchtslang.
- Er moet een druksensor toegevoegd worden bij de uitlaat om een tegendruk te kunnen meten.
- Wanneer een thermische flowmeter wordt toegepast zal deze zich na de luchtfilter, en voor de olieverniveelaar moeten bevinden. Het vocht wat aanwezig kan zijn in de lucht, met betrekking tot het plaatsen van een thermische flowmeter voor de luchtfilter, zal negatief invloed hebben op de meetnauwkeurigheid.
- Er moet een mogelijkheid zijn om een meting te doen naar de remmende werking van luchtmotoren, bijvoorbeeld wanneer deze een haspel moeten aandrijven. Dit wil zeggen dat de krachtopnemer onder andere de testmotor moet kunnen aandrijven, ofwel dat een elektromotor toegepast moet worden.

5.5.2 Definitieve eindconcept omschrijving

In figuur 6 wordt een geschetste weergave getoond van het definitieve eindconcept wat een horizontale opstelling bedraagt waarbij een elektromotor dient als krachtopnemer en koppelsensor. Door het toepassen van deze techniek zal de opstelling zeer compact blijven.



Figuur 6: Geschetste weergave van het definitieve eindconcept. De genummerde componenten worden behandeld in tabel 5.7.

De nummers in de geschetste weergave van het definitieve eindconcept corresponderen met de functievervullers in tabel 5.7.

Tabel 5.7: Functievervullers van het definitieve eindconcept. De componenten die worden behandeld zijn afkomstig uit de geschetste weergave in figuur 6.

Nr.	Functie	Functievervuller
1	Lucht filteren	Air filter
2	Luchtdebiet meten	Thermische debietmeter
3	Luchtdruk regelen	Elektronische drukregelaar
4	Lucht smeren	Air lubricator
5	Luchttransport aansluiten	Gevlochten slang
6	Luchtdruk meten	Druksensor
7	As koppelen	Balgkoppeling
8	Afschermen	Doorzichtige kap
9	Toerental meten	Incrementele encoder (flens)
10	Kracht opnemen/Koppel meten	Elektromotor
11	Samenstellen	L-motorbeugel
12	Motor testen	Testmotor
13	Lucht afvoeren en geluid dempen	Demper (afstand)

Lucht, afkomstig van het drukvat na de compressor, wordt aangevoerd naar een nabijgelegen pijp. Vervolgens zal de lucht gefilterd worden en langs een thermische flowmeter stromen. Dankzij het gebruik van een thermische flowmeter zal er nauwelijks obstructie plaatsvinden binnen de leiding. De luchtdruk wordt hierna elektronisch geregeld met behulp van een elektronische drukregelaar. Tot slot wordt de lucht gesmeerd en zal het via een gevlochten slang richting de motor stromen. Net voor de motor wordt de druk gemeten dankzij een druksensor. De elektronische drukregelaar compenseert voor de eventuele drukval die kan ontstaan en gemeten wordt door de druksensor. De druk van de uitgaande lucht wordt eveneens gemeten door een druksensor en getransporteerd naar een gesloten demper op afstand.

De elektromotor en testmotor zijn direct aan elkaar verbonden via een balgkoppeling. Zowel de testmotor als elektromotor worden ondersteund door verticale L-motorbeugels. De beugel van de testmotor moet horizontaal verplaatsbaar zijn op een montagevlak en is voorzien van klemgrepen. Het koppel van de testmotor wordt gemeten dankzij de elektromotor met behulp van elektronische parameters.

Door middel van een balgkoppeling worden uitlijnfouten grotendeels gecompenseerd, vindt er geen terugslag plaats en zullen schokken en trillingen grotendeels gedempt worden. Het toerental van de aandrijving wordt gemeten dankzij een encoderflens welke zicht bevindt tussen de elektromotor en bijbehorende montagebeugel. Door middel van een magneetring om de as binnen de encoderflens zullen pulsen gegenereerd worden om een toerental te genereren.

5.5.3 Keuzematrix definitieve eindconcept

Het definitieve eindconcept wordt nog getoetst tegenover de concepten in een tweede (controle)keuzematrix, weergegeven in tabel 5.8. Hiervoor worden dezelfde criteria en bijbehorende wegingen toegepast uit paragraaf 5.4.1. Dankzij de conceptevaluatie en nieuwe inzichten kunnen verhoudingen tussen de eerder vergeleken concepten enigszins zijn geschoven.

Tabel 5.8: Puntentelling per concept, inclusief definitieve eindconcept. Voor ieder criterium kan een score gegeven worden van 1 t/m 4, waarvan een bepaalde score niet twee keer toegekend mag worden.

Concepten, inclusief definitieve eindconcept, puntentelling toekennen									
Criteria	Weegfactor	Concept 1		Concept 2		Concept 3		Def. eindconcept	
		Punten	Incl. weging	Punten	Incl. weging	Punten	Incl. weging	Punten	Incl. weging
1.	7,5	1	7,5	2	15	3	22,5	4	30
2.	7,5	2	15	1	7,5	3	22,5	4	30
3.	4,5	4	18	2	9	1	4,5	3	13,5
4.	4,5	3	13,5	1	4,5	2	9	4	18
5.	7,5	4	30	1	7,5	2	15	3	22,5
6.	1,5	1	1,5	2	3	3	4,5	4	6
7.	6,5	1	6,5	2	13	4	26	3	19,5
8.	4	2	8	1	4	3	12	4	16
9.	1,5	1	1,5	2	3	3	4,5	4	6
10.	0	1	0	2	0	4	0	3	0
Totaal punten incl. weging:									
Max. = 180 (100%)		101,5 (56,4%)		66,5 (36,9%)		120,5 (66,9%)		161,5 (89,7%)	

Uit tabel 5.8 is af te leiden dat het definitieve eindconcept duidelijk de hoogste score behaalt. De tweede, derde en vierde plaats zijn respectievelijk nog gelijk gebleven ten opzichte van de eerdere keuzematrix in tabel 5.6. Deze resultaten laten zien dat het definitieve eindconcept, welke is samengesteld uit positieve kenmerken van concepten 1 tot en met 3 en aanvullingen uit de conceptevaluatie, daadwerkelijk positiever uitvalt dan de overige concepten.

Hoofdstuk 6 zal het ontwerpproces van een model met betrekking tot het definitieve eindconcept uitgebreid behandelen.

6. Detailleringfase

Dit hoofdstuk zal de detaillering van het eindconcept behandelen. Dit betreft een uitgebreide componentenkeuze met verantwoording, berekeningen omtrent de verwachte meetafwijkingen, ontwerptekeningen en -aanzichten en algemene toelichting van het werkingsprincipe.

6.1 Componentenkeuze

In deze sectie van het hoofdstuk zullen selecties van de belangrijkste componenten onderbouwd worden. Dit zal met name keuzes betreffen met betrekking tot sensoren en aandrijfcomponenten. Ook zijn tabellen opgesteld om de belangrijkste componentspecificaties te weergeven, waarvan de volledige (zo nodig ingekorte) datasheets in te lezen zijn in Bijlage I.

6.1.1 Krachtopnemer

De kracht die gegenereerd wordt door de testmotor moet opgevangen kunnen worden binnen een bereik van 5 – 15 kW, waarbij het toerental moet kunnen oplopen tot 2000 tpm en het koppel tot 190 Nm. Daarbij is het van belang dat de krachtopnemer ook kan aandrijven, om testmotoren te laten functioneren als hijslieren. Om deze reden is een elektromotor geschikt voor de beoogde toepassing.

Om de gewenste specificaties te behalen is een standaard elektromotor niet voldoende. Er zijn nauwelijks motoren beschikbaar die kunnen voldoen aan combinaties van dergelijke toerentallen en koppels. Binnen het afstudeerbedrijf is een elektromotor aanwezig welke in het verleden is gebruikt voor het testen van bepaalde luchtmotoren. De nominale specificaties van deze elektromotor komen redelijk in de buurt van de beoogde specificaties. Bovendien bevat de motor al een dynamisch remsysteem en een frequentieregelaar. Na contact te hebben gehad met de leverancier van deze motor is gebleken dat de beoogde specificaties behaald kunnen worden bij kortstondige overbelasting.

Deze elektromotor, de Sg160L-4, zal toegepast worden binnen de testopstelling. De belangrijkste specificaties, met betrekking tot aandrijven en remmen, worden weergegeven in tabel 6.1. De volledige datasheet is te vinden in Bijlage I.1.

Tabel 6.1: De belangrijkste specificaties van de elektromotor, model Sg160L-4, afkomstig uit de gerelateerde datasheet en persoonlijk contact.

¹⁾ Betreft motorspecificaties waarvan deels of volledig overbelast.

Specificaties van Sg160L-4		
Elektrisch, nominaal		
Voltage	400	U [V]
Stroomsterkte	27.8	I [A]
Connectie	3-fase	-
Frequentie	50	f [Hz]
Polen	4	-
Mechanisch, nominaal koppel		
Max. toerental	1460	n [tpm]
Max. koppel (bij 1460 tpm)	98,12	T [Nm]
Max. koppel (bij 2920 tpm) ¹	24	T [Nm]
Max. remkoppel (bij 2000 tpm) ¹	98,12	T [Nm]
Max. remkoppel (bij 3000 tpm) ¹	24	T [Nm]
Overbelast (tot maximaal 200% en 5 minuten) ¹		
Max. toerental	2920	n [tpm]
Max. koppel (bij 1460 tpm)	196,24	T [Nm]
Max. koppel (bij 2920 tpm)	48	T [Nm]
Max. remkoppel (bij 1460 tpm)	196,24	T [Nm]
Max. remkoppel (bij 2920 tpm)	48	T [Nm]
Algemene gegevens		
Massatraagheid	0,075	J [kg·m ²]
Gewicht	125	m [kg]
Rotatierichting	CW/CCW	-

De elektromotor levert, wanneer toegepast als aandrijving, op 1460 toeren per minuut een nominaal koppel van 98 Nm, en in overbelaste werking (maximaal 200%) een koppel van 196 Nm. Bij een toerental van 2920 toeren per minuut kan een koppel geleverd worden van 24 Nm, en in overbelaste werking 48 Nm. In de overbelaste stand kan de motor opereren voor een korte duur (ongeveer vijf minuten).

Wanneer de motor gebruikt wordt als rem zal deze tot 2000 toeren per minuut een nominaal koppel van 98 Nm, en in overbelaste werking een koppel van 196 Nm kunnen leveren. Op een toerental van 2920 toeren per minuut zal een nominaal remkoppel gegenereerd kunnen worden van eveneens 24 Nm, en in overbelaste toestand 48 Nm.

Er wordt onder andere een beveiliging geïmplementeerd om deze overbelasting toe te staan en eventuele schade te voorkomen dankzij hittevorming. Om een toerental-koppelcurve te genereren zal er maar voor korte duur getest worden, waardoor hij vaak zal kunnen opereren tot de beveiliging ingeschakeld wordt. Bij een eventuele inschakeling van de beveiliging dient er gewacht te worden tot de motor is afgekoeld tot een temperatuur waarbij een nieuwe test gedaan mag worden. Voor het doen van een test op tijdsduur zal er binnen de nominale waarden gebleven moeten worden.

6.1.2 Koppelsensor

Na op bezoek te zijn geweest bij de leverancier van de motor is een concept gegenereerd op basis van een door hun toegepast principe, namelijk het meten van koppel met behulp van een elektromotor. Dit is een ongebruikelijke methode om koppel te meten, en wordt over het algemeen kleinschalig toegepast door hobbyisten met laagvermogen elektromotoren om een zeer groffe schatting te maken van het gegenereerde koppel. Echter maakt de betreffende leverancier gebruik van een techniek om het koppel nauwkeurig te kunnen meten en garanderen een maximale meetafwijking van 1,5% op het nominale koppel van de Sg160L-4, wat een afwijking betreft van 1,47 Nm. Dit is een vaste afwijking en zal ook plaatsvinden bij een laag koppel. Deze meetnauwkeurigheid kan in de toekomst met behulp van andere componenten en ijkingen verder omlaag gebracht worden tot lager dan 1% op het nominale koppel van de motor.

De Sg160L-4 wordt dus toegepast als koppelsensor (en krachtopnemer) wat leidt tot een zeer compacte opstelling. De techniek om een koppel te meten betreft het monitoren van de elektrische parameters tijdens bedrijf in relatie tot het gemeten toerental en gegevens omtrent het rendement van de motor. Om het koppel zo nauwkeurig mogelijk te meten dienen er een aantal aanpassingen gedaan te worden. Zo is het behulpzaam om de massatraagheid, eveneens als de rotatiweerstand zo laag mogelijk te krijgen. Hiervoor zullen oliekeerring(en) verwijderd en de mechanische (nood)rem gedemonteerd worden. Specificaties van deze elektromotor, met betrekking tot zowel aandrijven als remmen, worden weergegeven in paragraaf 6.1.1.

De maximale meetafwijking voor het koppel, ofwel de TEB bij een worst case scenario, zal bedragen:

$$TEB_{wc,koppel} = \frac{1,47}{T} \times 100 = \pm \frac{147}{T} [\%]$$

De TEB van de elektromotor als koppelsensor zal procentueel gezien leiden tot een lage nauwkeurigheid bij het meten van lage koppels. Voor hogere koppels zal de nauwkeurigheid procentueel gezien juist stijgen. Op het maximaal belaste koppel van de elektromotor (196,23 Nm) in overbelaste toestand zal de meetafwijking voor koppel in een worst case scenario niet meer dan 0,75% bedragen.

Van het te meten prototype is niet bekend op welk toerental het maximale koppel optreedt. Wel is bekend dat het een maximaal vermogen zal hebben van ongeveer 10 kW (op 6 barg). Hier om zal de TEB voor deze motor uitgedrukt worden in alle onbekenden:

$$P = \frac{n \times T}{9,55} [W], \quad \text{dus:} \quad T = \frac{9,55P}{n} [Nm]$$

$$TEB_{wc,koppel} = \frac{15,4n}{P} [\%]$$

6.1.3 Toerental sensor

Voor het meten van een accurate waarde van het koppel is een zeer nauwkeurige en snelle encoder nodig. Dankzij hoge-resolutiemetingen van 4096 ppr en razendsnelle terugkoppeling naar de motor dankzij het communicatiesysteem Drive-Cliq is het mogelijk om tot de genoemde nauwkeurigheid voor het koppel meten te komen zoals beschreven in paragraaf 6.1.2.

De encoder wordt geselecteerd, in de motor gebouwd en eveneens aangesloten door de leverancier. Er is geen overige informatie van de sensor bekend. Wel kan er van uit gegaan worden dat voor de beoogde functie een maximale meetafwijking, ofwel de TEB voor een worst case scenario, van deze encoder ongeveer 0,3% betreft.

6.1.4 Druksensor

Het toepassingsgebied van de benodigde druksensor bedraagt een systeem waar in de luchtdruk altijd tussen de 0 en 10 barg zal bedragen, zowel bij inlaat als uitlaat. Tijdens het testen voor prestaties van testmotoren zal de sensor in kort bedrijf zijn en ontstaan er nauwelijks temperatuurverschillen. Bij een lange duurttest kan de motor enigszins opwarmen waardoor de warmte kan geleiden naar de sensoraansluiting. Echter zal de stromende lucht een koelend effect hebben waardoor temperatuurverschillen door opwarming niet significant zullen zijn. De temperatuur aan de uitlaatkant wordt wel koud dankzij uitzetting van de lucht, en zal mogelijk tot enkele graden onder nul kunnen dalen na langdurig testen.

Een geschikte sensor is de 10 bar variant van de AE-SML-serie. De belangrijkste specificaties van de sensor worden weergegeven in tabel 6.2. De volledige datasheet is te vinden in Bijlage I.2.

Tabel 6.2: De belangrijkste specificaties van de druksensoren, de 10 bar modellen van de AE-SML-serie, afkomstig uit de gerelateerde datasheet.

Specificaties AE-SML 10.0-0010B		
Bereik		
Measuring range	10,0	p [bar]
Overload pressure	20	p [bar]
Burst pressure	30	p [bar]
Nauwkeurigheid		
Accuracy @ RT	≤ 0,50	[% of range]
Non-linearity	≤ 0,15	[% BFS]
Stability/year	≤ 0,15	[% of range]
Toegestane temperatuurbereik		
Reference temperature	25	T [°C]
Measuring medium	-40 ... 125	T [°C]
Ambience	-40 ... 105	T [°C]
Storage	-40 ... 125	T [°C]
Compensated range	-20 ... 85	T [°C]
Mean TC offset	≤ 0,15 / 10K	[% of range]
Mean TC range	≤ 0,15 / 10K	[% of range]
Total error	2,00 bij -40°C 2,00 bij 105°C	[% of range]

De TEB, in de tabel aangegeven als total error, wordt reeds aangegeven voor de uiterste temperaturen van -40°C en 105°C. Het toepassingsgebied zal zich bevinden in een omgeving met omgevingstemperaturen tussen 5°C en 35°C. Na een aantal tests bleek dat de temperatuur van de uitgaande luchtstroom na het drukvat nagenoeg gelijk is aan de luchttemperatuur. Dit geldt overigens voor stromingen bij korte motortesten, omdat de lucht dan afkomstig is van het drukvat. Wanneer er lang getest zal worden op een hoog debiet kan het drukvat leeg raken en zal de aangevoerde lucht direct van de compressor komen, waardoor de temperatuur van de stroming waarschijnlijk hoger zal worden. Voor het testen van motoren waarbij hoge debieten benodigd zijn zal een andere compressor toegepast worden.

De referentietemperatuur bedraagt 25°C. De grootste temperatuurverandering zal dus 20°C zijn (in de winter). In tabel 6.2 kan afgelezen worden dat er twee verschillende factoren met betrekking tot temperatuurverandering invloed hebben op de TEB. Beiden bedragen een afwijking van 0,15% op het

totale bereik per 10 kelvin aan temperatuursverandering. Dit betekent bij een temperatuurverschil van 20°C dat tweemaal een afwijking op kan treden van 0,3% ten opzichte van het volledige bereik.

Omdat er maximaal op 10 barg luchtdruk getest zal worden kan de TEB van de druksensoren bepaald worden voor een worst case scenario, eveneens als op statistische wijze.

Worst case:

$$TEB_{wc,druk} = e_{accuracy} + e_{tc,offset} + e_{tc,range} [\%]$$

$$TEB_{wc,druk} = 0,5 + 0,3 + 0,3 = \pm 1,1\%$$

Statistisch gesommeerd:

$$TEB_{sg,druk} = \sqrt{e_{accuracy}^2 + e_{tc,offset}^2 + e_{tc,range}^2} [\%]$$

$$TEB_{sg,druk} = \sqrt{0,5^2 + 0,3^2 + 0,3^2} = \pm 0,66\%$$

Er moet in acht worden genomen dat een bijkomende afwijking kan ontstaan van maximaal 0,15% per jaar.

6.1.5 Debietsensor

Voor het meten van de flow is gekozen voor een thermische massaflow sensor. Dit is een type flowsensor met in het algemeen een groot bereik en gebruikelijk om toe te passen voor gassen. Een ander groot voordeel van een dergelijke sensor, ten opzichte van andere flow meetsystemen, is de minimale restrictie in de leiding. Hierdoor zal de drukverlaging die ontstaat verwaarloosbaar zijn.

Veel thermische flowsensoren meten de massastroom van een medium dankzij de temperatuurverandering tussen een verwarmde en referentie temperatuursensor. De massastroom van het stromende medium is evenredig met de afgifte van warmte-energie via het verwarmde element. Normaliter, bij een constante druk en temperatuur van het medium, kan aan de hand van deze gegevens de massastroom omgezet worden in een volumestroom. Wanneer deze niet constant zijn zal de dichtheid van het medium doorgaans het proces veranderen wat leidt tot inaccurate meetresultaten van het volumestroom. In dit geval zal een druk- en temperatuursensor benodigd zijn om de variabele dichtheid te kunnen bepalen.

De VA 520 flowsensor betreft een thermische flowsensor welke toe te passen is tot volumestromen van 1195 m³/h, ofwel 332 l/sec, bij een interne pijpdiameter van 53,1 mm. Bovendien beschikken ze over een calometrisch meetprincipe, waardoor de volumestroom eveneens bepaald kan worden aan de hand van de gemeten massastroom. De belangrijkste gegevens van de sensor worden weergegeven in tabel 6.3. Een volledige datasheet kan worden geraadpleegd in Bijlage I.3.

Tabel 6.3: De belangrijkste specificaties van de debietsensor, het model VA 520 met aansluitmaten R2", afkomstig uit de gerelateerde datasheet.

¹⁾ Betreft de TEB. Alle aspecten omtrent de meetafwijking zijn reeds meegenomen.

Specificaties VA 520 R2"		
Bereik		
Measuring range	2,0 ... 1195	Q [m ³ /h]
Operating temperature	-30 ... 80	T [°C]
Operating pressure	Up to 16	p [bar]
Nauwkeurigheid		
Accuracy ¹	± 1,5	[% of m.v.]
	± 0,3	[% of f.s.]
Elektrisch		
Power supply	24 ± 3,6	U [VDC smoothed]
Analogue output	4 ... 20	I [mA]

Het volledige bereik van de sensor zal nagenoeg gebruikt kunnen worden waardoor de hierbij behorende nauwkeurigheid berekend kan worden voor een worst case scenario en op statistische wijze.

Worst case:

$$TEB_{wc,debiet} = e_{accuracy,1} + e_{accuracy,2} [\%]$$

$$TEB_{wc,debiet} = 1,5 + 0,3 = \pm 1,8\%$$

Statistisch gesommeerd:

$$TEB_{sg,debiet} = \sqrt{e_{accuracy,1}^2 + e_{accuracy,2}^2} [\%]$$

$$TEB_{sg,debiet} = \sqrt{1,5^2 + 0,3^2} = \pm 1,53\%$$

6.1.6 Elektronische drukregelaar

Luchtmotoren zijn met betrekking tot het te leveren vermogen erg afhankelijk van de druk van de ingaande perslucht. Als de druk voor een paar tiende bar wegzakt zal een groot verschil in toerental waar te nemen zijn. In het geval bij grote motoren waarbij een hoge flow plaatsvindt bij hoge toerentallen zal de druk enigszins weg kunnen vallen. Om deze drukval tegen te gaan kan een elektronisch bestuurd drukregelaar toegepast worden welke inspeelt op de meetsignalen van de druksensoren.

De drukregelaar moet een hoge flow kunnen doorlaten. In tabel 4.1 in hoofdstuk 4.4 wordt weergegeven dat een maximale flow van 310 liter per seconde (18.600 liter per minuut) vrije lucht benodigd is op een luchtdruk van zeven bar en het maximale toerental van een V12 motor.

Bovendien heeft deze motor aansluitmaten van G2" volgens BSP.

Een elektronische drukregelaar welke voldoet aan de gestelde eisen is de REGTRONIC 400 2" REMOTE CONTROL. De belangrijkste specificaties van deze drukregelaar worden weergegeven in tabel 6.4. De desbetreffende datasheet kan worden ingelezen in Bijlage I.4.

Tabel 6.4: De belangrijkste specificaties van de drukregelaar, de REGTRONIC 400 2" REMOTE CONTROL, afkomstig uit de gerelateerde datasheet.

Specificaties van REGTRONIC 400 2" REMOTE CONTROL		
Bereik		
Min. inlet pressure	Regulating pressure + 1	p [bar]
Max. inlet pressure	11	p [bar]
Pressure range	0,05 ... 10	p [bar]
Max. flow rate	20.000	Q [l/min]
Nauwkeurigheid		
Linearity	$\leq \pm 0,5$	[% of Full Scale]
Hysteresis	$\leq \pm 0,2$	[% of Full Scale]
Repeatability	$\leq \pm 0,2$	[% of Full Scale]
Sensitivity/Dead-band	10 ... 100	p [mbar]
Output accuracy display	$\leq \pm 0,3$	[% of Full Scale]
Output accuracy analog	$\leq \pm 0,4$	[% of Full Scale]
Toegestane temperatuurbereik		
Temperature range	0 ... 50	T [°C]
Temperature characteristics	Max. 2 / °C	p [mbar]

Deze drukregelaar kan over een drukval van 0,5 bar een flow van 18.000 liter per minuut vrije lucht doorlaten en kan de maximaal uitgaande luchtdruk van de aanwezige compressoren van 10 bar weerstaan. De nauwkeurigheid van de druksensor in deze regelaar, en de aansturing van de regelaar zelf is niet van belang, omdat het zal sturen op basis van de meetresultaten van de druksensor net voor de inlaat van de motor.

6.1.7 Koppeling

Het koppel van zowel de testmotor als de krachtopnemer moet via de assen worden overgedragen aan elkaar. Hier voor zijn een aantal soorten koppelingen beschikbaar. Er is gekozen voor een balgkoppeling omdat deze over het algemeen kunnen compenseren voor (grote) uitlijnfouten, een dempend effect hebben en een hoge torsiestijfheid bevatten. Bovendien hebben balgkoppelingen een laag traagheidsmoment wat ten goede komt voor de nauwkeurigheid van het te meten koppel. Een geschikte balgkoppeling is de BKL Serie 300. Een overzicht van de belangrijkste specificaties wordt weergegeven in tabel 6.5. Een volledige datasheet kan geraadpleegd worden in Bijlage I.5.

Tabel 6.5: De belangrijkste specificaties van de balgkoppeling, de BKL Serie 300, afkomstig uit de gerelateerde datasheet.

Specificaties van BKL Serie 300		
Algemeen		
Rated torque	300	T [Nm]
Overload torque	450	T [Nm]
Moment of inertia	3,1	J [10^{-3} kgm ²]
Weight (approx.)	1,6	m [kg]
Dimensies		
Overall length	109	L [mm]
Fit length	41	L _{fit} [mm]
Outside diameter	110	D _o [mm]
Inside diameter 1	42	D ₁ [mm]
Inside diameter 2	28	D ₂ [mm]
Uitlijning		
Axial max.	2	→ [mm]
Lateral max.	0,2	↑ [mm]
Angular max.	1	∠ [°]

Deze koppeling kan worden belast tot een nominaal koppel van 300 Nm welke overbelast kan worden tot anderhalf keer de hoeveelheid. Aangezien zowel de testmotoren als de krachtopnemer theoretisch geen hogere koppels kunnen leveren dan 200 Nm zal dit voldoen. Bij onvoorziene zaken, zoals willekeurige koppelpieken kunnen deze tot 450 Nm nog opgevangen worden. Door middel van een klemnaaf wordt de koppeling gemonteerd aan de as. Een naafdiameter van 42mm en 28mm is gekozen wat respectievelijk overeenkomt met de asdiameters van de elektromotor en de grootste testmotor. Wanneer een testmotor wordt aangesloten met een kleinere asmaat zal een bus worden toegepast om het verschil te overbruggen.

6.2 Gecombineerde meetafwijking

De afwijkingen die kunnen optreden in ieder meetinstrument hebben invloed op het algehele meetresultaat. In een situatie waarbij het gemeten koppel met een exacte nauwkeurigheid wordt gemeten, maar een afwijking optreedt in de druksensor, zal het bijbehorende koppel voor een gegeven hoeveelheid druk alsnog niet overeenkomen met de realiteit. Daarom zullen de mogelijke meetafwijkingen samengevoegd moeten worden zodat duidelijk wordt wat de gecombineerde meetafwijking inhoudt. De methode die hier voor wordt toegepast wordt behandeld in Bijlage E.

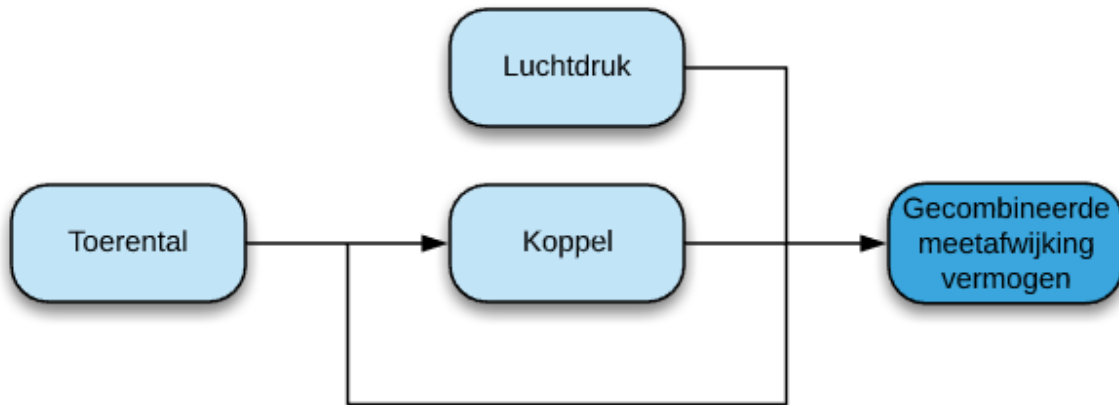
De twee meest interessante verhoudingen tussen specificaties zijn:

- Het vermogen bij een bepaalde hoeveelheid druk, ofwel de relatie tussen het koppel, toerental en de druk
- Het rendement bij een bepaald toerental, ofwel de relatie tussen het verbruik, toerental en de druk

De gecombineerde meetafwijking wordt uiteindelijk vergeleken met de gestelde eisen uit het Programma van Eisen, zie deelhoofdstuk 2.3. De gegevens die toegepast worden in de betreffende berekeningen zijn afkomstig van de paragrafen uit deelhoofdstuk 6.1.

6.2.1 Gecombineerde meetafwijking vermogen

De relaties tussen de meeteigenschappen worden weergegeven in figuur 7. In dit figuur is te zien welke meetafwijkingen effect zullen hebben op de gecombineerde meetafwijking voor het bepalen van het vermogen.



Figuur 7: Relaties met betrekking tot de gecombineerde meetafwijking voor het te meten vermogen.

Opvallend is dat het toerental zowel effect heeft op de meetbaarheid van het koppel, en de gecombineerde meetafwijking. Omdat het koppel niet gemeten wordt met een directe koppelsensor, maar met behulp van een elektromotor, is dit sterk afhankelijk van het toerental van de motor. De leverancier heeft aangegeven dat de maximale meetafwijking 1,5% bedraagt voor het nominale koppel, waar in het meetresultaat van het toerental reeds is meegenomen.

De gecombineerde meetafwijking voor het bepalen van het motorvermogen kan dan als volgt bepaald worden voor een worst case scenario en op statistische wijze.

Worst case:

$$e_{wc,vermogen} = TEB_{wc,druk} + TEB_{wc,koppel} + TEB_{wc,toerental} [\%]$$

$$e_{wc,vermogen} = 1,1 + \left(\frac{147}{T}\right) + 0,3 = \frac{147}{T} + 1,4 [\%]$$

Statistisch gesommeerd:

$$e_{sg,vermogen} = \sqrt{TEB_{sg,druk}^2 + TEB_{sg,koppel}^2 + TEB_{sg,toerental}^2} [\%]$$

$$e_{sg,vermogen} = \sqrt{0,66^2 + \left(\frac{147}{T}\right)^2 + 0,3^2} = \sqrt{\left(\frac{147}{T}\right)^2 + 0,53} [\%]$$

Omdat de nauwkeurigheid voor het meten van het koppel afhankelijk is van de hoeveelheid koppel die aanwezig is zal bepaald moeten worden hoe hoog het minimale koppel moet zijn zodat de gecombineerde meetafwijking voor het vermogen binnen de eis van maximaal 5% blijft. De vergelijking wordt hierom uitgedrukt in het minimale koppel.

Worst case:

$$T \geq \frac{147}{e_{wc,vermogen} - TEB_{wc,druk} - TEB_{wc,toerental}} [Nm]$$

$$T \geq \frac{147}{5 - 1,1 - 0,3} \geq 40,8 Nm$$

Statistisch gesommeerd:

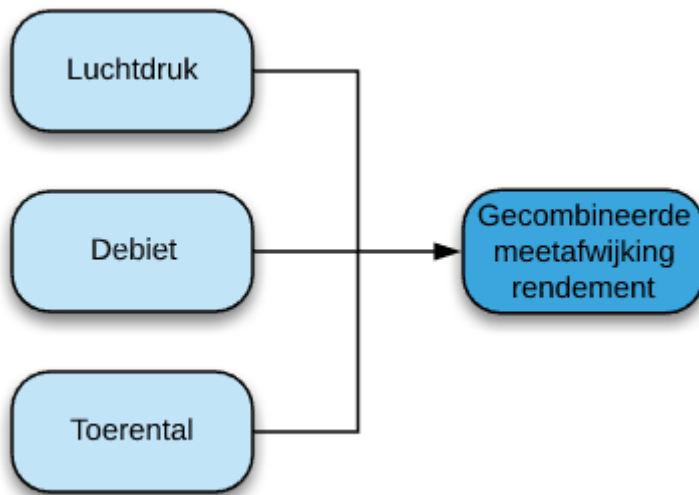
$$T \geq \sqrt{\frac{2,16 \times 10^4}{e_{sg,vermogen}^2 - TEB_{sg,druk}^2 - TEB_{sg,toerental}^2}} [Nm]$$

$$T \geq \sqrt{\frac{2,16 \times 10^4}{5^2 - 0,66^2 - 0,3^2}} \geq 29,7 Nm$$

Wanneer alle corresponderende meetafwijkingen ingevuld worden zal hier uit geconcludeerd worden dat de gecombineerde meetonzekerheid niet meer zal zijn dan 5% bij een koppel van 29,7 Nm of hoger. Dit resultaat betreft een correctheid in 99,7% van de meetresultaten op basis van drie keer de standaardafwijking in de normale verdeling. In een worst case scenario, waarin alle afwijkingen maximaal zijn, zal het koppel hoger moeten zijn dan 40,8 Nm om te voldoen aan de eisen.

6.2.2 Gecombineerde meetafwijking rendement

De gecombineerde afwijking voor het meten van het rendement is wat eenvoudiger. In dit geval zal de nauwkeurigheid van de encoder, de ingaande druksensor en de debietmeter een rol spelen, zie figuur 8.



Figuur 8: Relaties met betrekking tot de gecombineerde meetafwijking voor het te meten rendement.

De gecombineerde meetafwijking voor het rendement van de testmotor kan dan als volgt bepaald worden voor een worst case scenario en op statistische wijze.

Worst case:

$$e_{wc,rendement} = TEB_{wc,druk} + TEB_{wc,debiet} + TEB_{wc,toerental} [\%]$$

$$e_{wc,rendement} = 1,1 + 1,8 + 0,3 = \pm 3,2\%$$

Statistisch gesommeerd:

$$e_{sg,rendement} = \sqrt{TEB_{sg,druk}^2 + TEB_{sg,debiet}^2 + TEB_{sg,toerental}^2} [\%]$$

$$e_{sg,rendement} = \sqrt{0,66^2 + 1,53^2 + 0,3^2} = \pm 1,69\%$$

Er kan geconcludeerd worden dat de gecombineerde meetafwijking voor het rendement maximaal 1,69% zal zijn. Dit resultaat betreft een correctheid in 99,7% van de meetresultaten op basis van drie keer de standaardafwijking in de normale verdeling. In een worst case scenario, waarin alle afwijkingen maximaal zijn, kan de gecombineerde meetafwijking 3,2% bedragen.

6.2.3 Overzicht meetafwijkingen

De optredende afwijkingen van, zowel statistisch benaderd als voor een worst case scenario, zijn berekend per deelcomponent welke invloed heeft op de gewenste meetresultaten volgens paragraaf 4.1.2. Deze afwijkingen worden samengevat in tabel 6.6, eveneens als de gecombineerde meetonzekerheden. Alle data in de tabel is afkomstig uit deelhoofdstukken 6.1 en 6.2.

Tabel 6.6: Een overzicht van de maximale meetafwijkingen van de sensoren en gecombineerde meetafwijkingen van het systeem.

¹⁾ Alleen de uiterste grenzen, ofwel worst case gegevens, zijn gegeven.

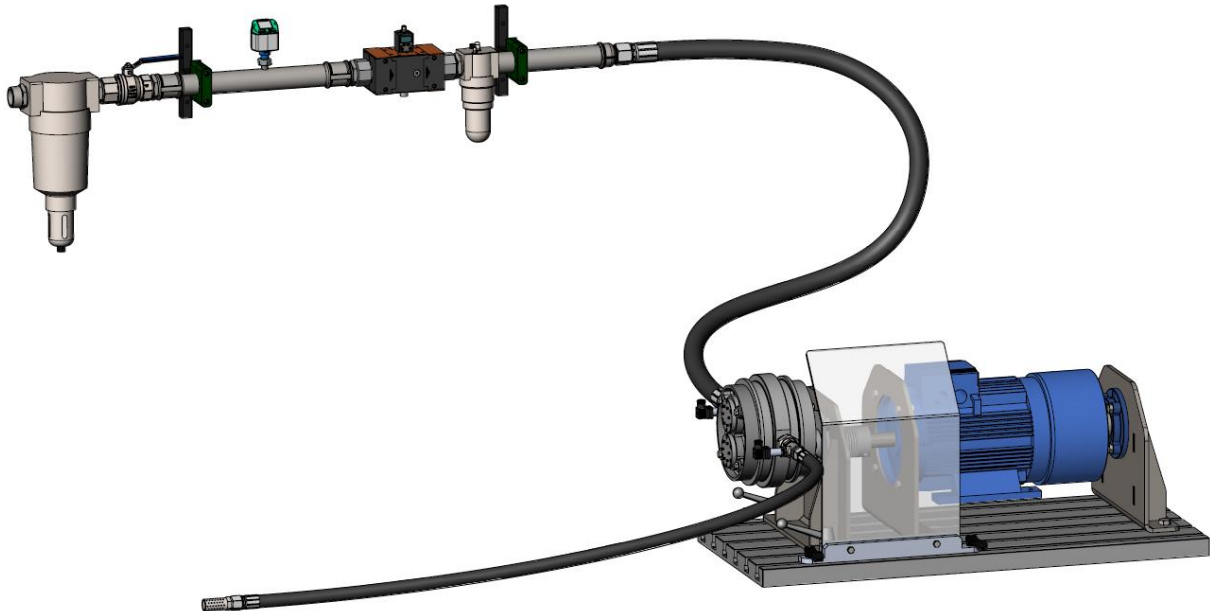
Aspect	Worst case (0,27%) [%]	Statistisch (99,73%) [%]
Maximale afwijking enkel instrument [%]		
Koppelsensor ¹	$\pm \frac{147}{T}$	-
Encoder ¹	$\pm 0,3$	-
Druksensor	$\pm 1,1$	$\pm 0,66$
Debietsensor	$\pm 1,8$	$\pm 1,53$
Gecombineerde maximale afwijking [%]		
Vermogen	$\pm \frac{147}{T} + 1,4$	$\pm \sqrt{\left(\frac{147}{T}\right)^2 + 0,53}$
Rendement	$\pm 3,2$	$\pm 1,69$
Minimale koppel bij gecombineerde maximale afwijking [Nm]		
Vermogen	$\geq 40,8$	$\geq 29,7$

De berekende meetafwijkingen zijn bepaald aan de hand van maximale bedrijfssituaties binnen de testopstelling. Over het algemeen neemt de nauwkeurigheid van een sensor af als de last toeneemt. Dit betekent dat de nauwkeurigheid gunstiger kan zijn dan aangegeven in deelhoofdstuk 6.2 en tabel 6.6 wanneer een kleiner gedeelte van het sensorbereik wordt gebruikt, behalve voor het koppel.

6.3 Definitief ontwerp

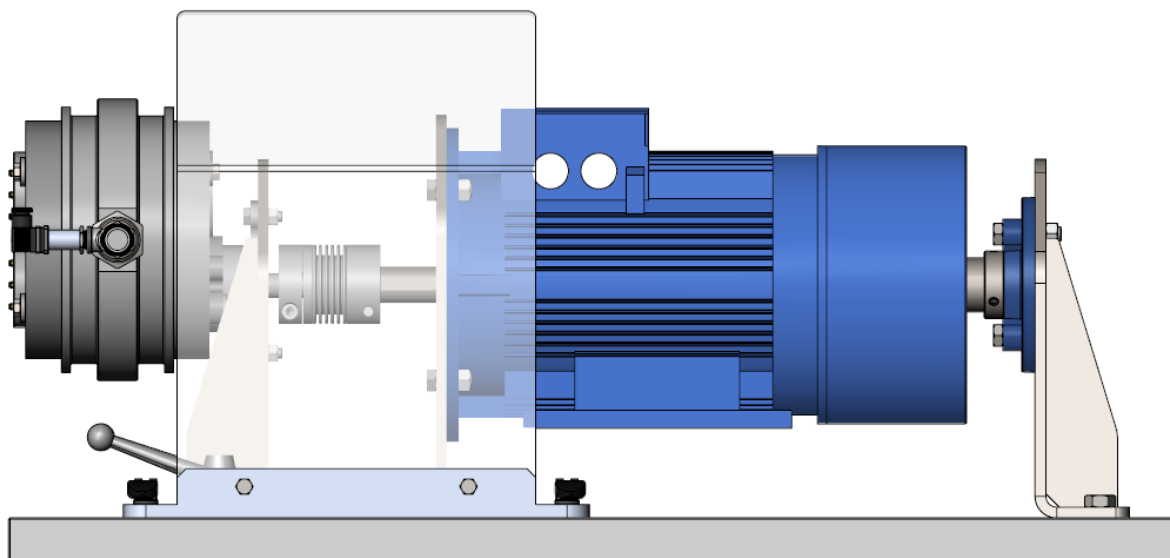
6.3.1 Het model

Het definitieve ontwerp wordt weergegeven in figuur 9. Dit ontwerp is gecreëerd aan de hand van de componentenkeuze in deelhoofdstuk 6.1 en overige onderdelen welke verder in dit hoofdstuk worden behandeld. In Bijlage G worden twee onderdelenlijsten weergegeven van de opstelling.



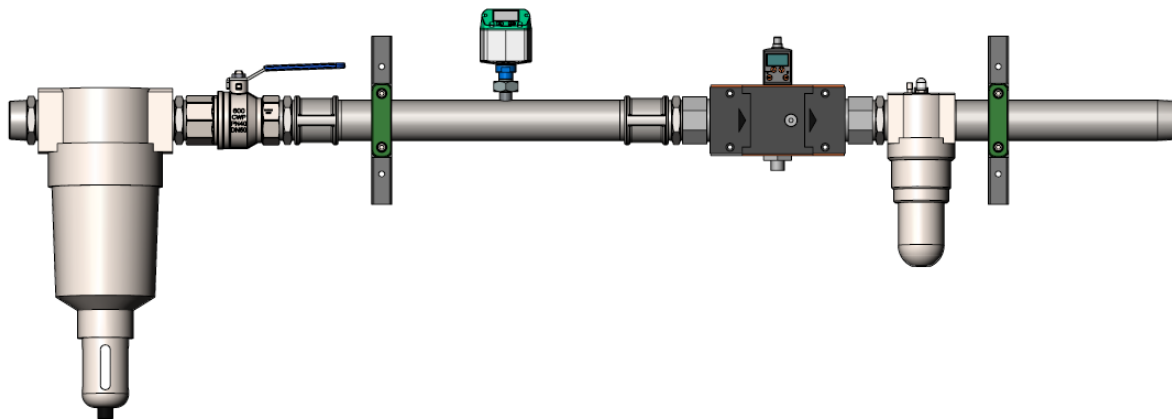
Figuur 9: 3D-model van het definitieve ontwerp van de meetopstelling, gecreëerd in Solidworks. Ter illustratie is het nieuwe motor prototype (links) gemonteerd.

Het ontwerp wordt onderverdeeld in twee delen, namelijk de hoofdleiding, welke gemonteerd wordt aan de wand, en de meetopstelling.



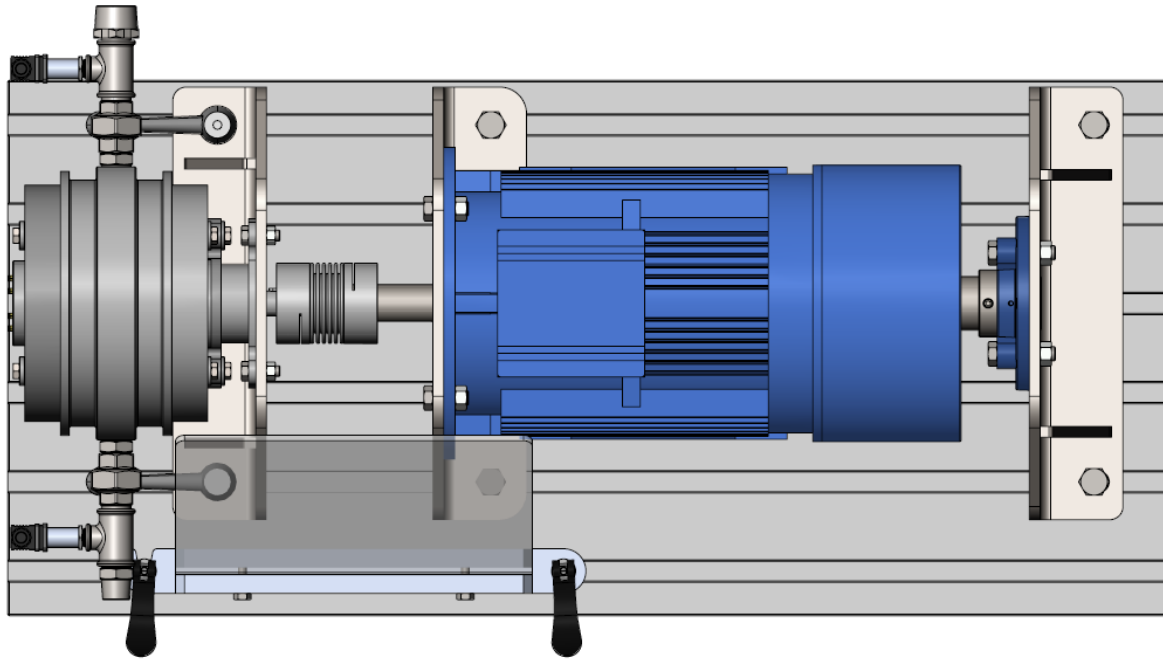
Figuur 10: 3D-model van de meetopstelling, onderdeel van het definitieve ontwerp. Ter illustratie is het nieuwe motor prototype (links) gemonteerd.

In figuur 10 wordt de meetopstelling weergegeven. Hier is te zien dat de opstelling geplaatst is op een gietijzeren vlakplaat met T-gleuven. De deelcomponenten kunnen zo gemonteerd worden met behulp van T-gleufmoeren. De elektromotor dient als krachtopnemer, aandrijver en koppelsensor en zal vast gemonteerd worden aan een rechtopstaande motorbeugel. Een encoder is in de motor ingebouwd om het toerental te meten. Aan de achterkant van de elektromotor is een aparte as gemonteerd in een lagerhuis om de motor te ondersteunen (zie paragraaf 6.3.2.4). De testmotor, in figuren weergegeven als het nieuwe prototype, wordt eveneens gemonteerd op een rechtopstaande motorbeugel. Deze beugel is in de lengterichting eenvoudig in te stellen met behulp van klemhefbomen. De assen worden met elkaar verbonden dankzij een balgkoppeling. Een beschermkap is geplaatst tussen de gebruiker en de draaiende onderdelen, welke met excenterhefbomen eenvoudig te verplaatsen is.



Figuur 11: 3D-model van de hoofdleiding voor de perslucht, onderdeel van het definitieve ontwerp.

Figuur 11 toont de hoofdleiding waar de perslucht respectievelijk gefilterd wordt, het debiet wordt gemeten, de druk wordt gereguleerd en tot slot de lucht gesmeerd wordt met olie. In de leiding is een veiligheidskraan gemonteerd om de stroming te stoppen wanneer gewenst. Deze hoofdleiding zal verbonden worden met behulp van een gevlochten slang met het inlaatstuk van de testmotor, welke wordt weergegeven in figuur 12. Aan het de uitlaatkant wordt een gevlochten slang verbonden waar een demper aan gemonteerd is. Deze bevindt zich in een deels gesloten container gevuld met dempmateriaal, zoals kartonnen afval. Ook is te zien dat aan de in- en uitlaat kant zich een druksensor bevindt. De elektronische drukregelaar in de hoofdleiding zal compenseren voor eventuele drukverlagingen dankzij grote stromingen of overige zaken aan de hand van de gemeten druk net voor de inlaat.



Figuur 12: Bovenaanzicht van het 3D-model van de meetopstelling, onderdeel van het definitieve ontwerp. Ter illustratie is het nieuwe motor prototype (links) gemonteerd.

Tot slot zal door de programmeur een kast geleverd worden inclusief besturingscomponenten en een 7" touchscreen panel. Alle testprogramma's worden voorgeprogrammeerd en de meetsignalen worden zowel tijdens het testen live weergegeven in digitale meters op de panel als gelogd in CSV-bestanden. Bovendien zal er ook een mogelijkheid zijn om de motor handmatig via de panel te besturen.

6.3.2 Ontwerpkeuzes

In deze paragraaf worden de ontwerpkeuzes voor het ontwerp verantwoord. Deze keuzes zijn op basis van componentgroepen verder onderverdeeld in deelparagrafen.

6.3.2.1 Hoofdleiding perslucht

De hoofdleiding met aan beide uiteinden een R2" aansluiting, zoals weergegeven in figuur 11, heeft als doel om de aangeleverde perslucht te behandelen tot het de testmotor bereikt. De gehele leiding hangt aan twee klembeugels aan de wand naast de testopstelling. In de leiding is een veiligheidskraan toegevoegd om de persluchtleiding af te sluiten wanneer gewenst.

Allereerst zal de lucht door een filter getransporteerd worden. Dankzij het filteren van de lucht zal er geen vocht in de lucht zitten wat kan leiden tot negatieve debietmetingen. Bovendien is een filter ook benodigd om de levensduur van luchtmotoren te garanderen. Vervolgens kan het debiet gemeten worden door de thermische debietmeter (paragraaf 6.1.5), welke in staat is om direct de volumestroom te meten van de stroming. Verder zal de druk van de stroming automatisch geregeld worden met behulp van de elektronische drukregelaar (paragraaf 6.1.6) aan de hand van de meetgegevens van de druksensor aan de testmotor. Deze drukregelaar zal compenseren voor eventuele drukvallen tijdens het testen. Tot slot wordt de lucht gesmeerd in een olievernaveelaar om de testmotoren te smeren.

6.3.2.2 Luchtaansluiting testmotoren

De hoofdleiding wordt gekoppeld aan een verbindstuk, welke gemonteerd wordt aan de testmotor, met behulp van een gevlochten slang met aansluitmaten G1½" of G2", afhankelijk van de aansluitmaat in de testmotor. De verbinding betreft een 3-delige koppeling gemonteerd met een T-stuk waarin de druksensor (paragraaf 6.1.4) wordt gemonteerd. Dankzij de 3-delige koppeling kan het gehele verbindstuk gemonteerd worden zonder dat de bekabeling van de druksensor doorgedraaid wordt. Dit verbindstuk is aanwezig in aansluitmaten van 1" tot en met 2", eveneens afhankelijk van de aansluitmaat van de testmotor, en kan verbonden worden aan de gevlochten slang met behulp van een verloop- of reduceerkoppeling. Een aanzicht van de verbindstukken, inclusief sensoren, wordt getoond in figuur 12.

Aan de uitlaatkant wordt ditzelfde principe toegepast. Aan dit verbindstuk zal eveneens een gevlochten slang gemonteerd worden welke verbonden is met een demper op afstand. De locatie van de demper heeft geen invloed op de prestaties indien er genoeg stroming wordt toegelaten. Een demper op afstand wordt met name toegepast om de vrijkomende olieniveau op afstand te houden van de opstelling en de gebruiker. Bovendien leidt het ook tot een afname van het geluidsniveau wat zich rond de gebruiker bevindt.

6.3.2.3 Testoppervlak

Om een goede uitlijning te waarborgen is het nodig om de opstelling op een recht oppervlak te plaatsen. Hierom wordt een gietijzeren vlakplaat toegepast met T-gleuven. De gleuven bieden de mogelijkheid om eenvoudig componenten binnen de opstelling in de lengterichting te verschuiven. Op deze manier kan bij verschillende as lengtes eenvoudig de montagebeugel voor de testmotor op de juiste afstand ten opzichte van de elektromotor geplaatst worden. Ditzelfde geldt voor de beschermplaat. Een tekening van de plaat worden weergegeven in Bijlage J.4.

6.3.2.4 Ondersteuning krachtopnemer

De krachtopnemer, ofwel de elektromotor en koppelsensor (paragraaf 6.1.1 en 6.1.2) wordt gemonteerd aan een rechtopstaande motorbeugel. Deze beugels zijn eenvoudig en goedkoop te laten produceren. De hoogte van het montagepunt in de beugel is bepaald aan de hand van de hoogte van reeds aanwezige beugels voor luchtmotoren.

Om te bepalen of een enkele montagebeugel voldoet met betrekking tot de uitlijning zijn berekeningen gemaakt welke worden behandeld in Bijlage F.1. Hieruit blijkt dat een hoekverdraaiing dankzij doorbuiging optreedt wat niet ten goede komt van de uitlijning. Het is gunstig om de montagebeugel te verstevigen met ribben, of de elektromotor aan de achterkant te ondersteunen om uitlijnfouten te minimaliseren.

De elektromotor bevat een op maat gemaakte kap aan de achterkant waar aan een draagas is verbonden. In een eerder project is deze motor toegepast binnen een draaiende opstelling waarbij de draagas werd ondersteund door een lagerhuis. Dit lagerhuis bevond zich in een rechtopstaande montagebeugel welke een gelijke montagehoogte heeft als de beugels voor de luchtmotoren. Het lagerhuis met bijbehorende montagebeugel zijn nog aanwezig en worden opnieuw toegepast om de elektromotor van achteren te ondersteunen. Een controleberekening is gemaakt om te controleren wat het effect van de ondersteuning is op de uitlijning en wordt behandeld in Bijlage F.2. Geconcludeerd kan worden dat bij het toepassen van twee montagebeugels de uitlijning volgens de gestelde eisen voldoet, wat wordt onderbouwd in Bijlage F.3. De tekening voor de voorste montagebeugel wordt weergegeven in Bijlage J.1.

6.3.2.5 Ondersteuning testmotor

Voor het ondersteunen van de testmotoren is het vrijwel genoodzaakt om een rechtopstaande montagebeugel toe te passen in verband met gebrek aan de mogelijkheid om voetsteunen te monteren. Montagebeugels voor de benodigde flensmatten, met gelijke montagehoogte als de beugels van de krachtopnemer zijn reeds aanwezig.

De montagebeugels worden geklemd aan het testoppervlak met behulp van klemhefbomen. Deze bieden een snelle en eenvoudige manier om de testmotor in lengterichting te verplaatsen wanneer nodig.

6.3.2.6 Askoppeling

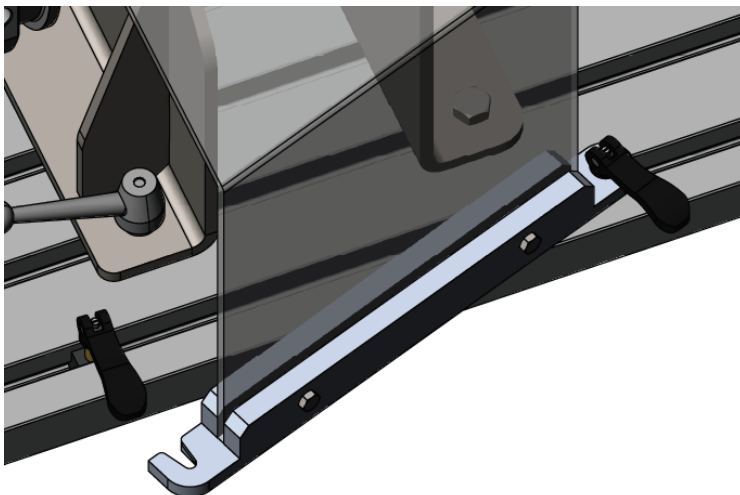
Om een lage weerstand te creëren in de aandrijving, wat benodigd is om een zo nauwkeurig mogelijk koppel te meten, is het noodzakelijk om een goede uitlijning te realiseren. Aangezien een exacte uitlijning lastig is om te implementeren is het gebruik van een klauw- of balgkoppeling gewenst. Deze zijn in staat om (grote) uitlijnfouten op te vangen en om schokken in de aandrijflijn te dempen.

Een klauwkoppeling is een goede oplossing tegen dergelijke uitlijnfouten. Bovendien biedt het de mogelijkheid om een vaste koppelingshelft te monteren aan de krachtopnemer, waardoor alleen de andere helft omgewisseld hoeft te worden bij verschillende asdiameters. Echter treedt er tussen de koppelingshelften, en vooral bij grotere uitlijnfouten, enigszins wrijving op.

Om dit te voorkomen is er gekozen voor een balgkoppeling, welke wordt behandeld in paragraaf 6.1.7 en eveneens getoond in figuur 12. Dit type koppeling heeft een hoge torsiestijfheid, een lage massa traagheid (voor een nauwkeurigere koppelmeting), een dempende werking en kan worden uitgerust met klembussen aan beiden kanten. Door het vermijden van een koppelingen met stelschroeven en spiegaten worden respectievelijk slip en terugslag voorkomen. Aangezien er geen koppelingshelften omgewisseld kunnen worden bij verschillende asdiameters zullen reeds aanwezige asbussen toegepast worden om het verschil te overbruggen.

6.3.2.7 Beschermkap

De beschermkap biedt veiligheid aan de gebruiker tegen de draaiende onderdelen. Het is dan ook van belang dat de kap slagvast en relatief sterk is. Bovendien moet de kap doorzichtig zijn zodat eventuele problemen met de aandrijving vroegtijdig opgemerkt kunnen worden.



Figuur 13: 3D-model van de beschermkap.

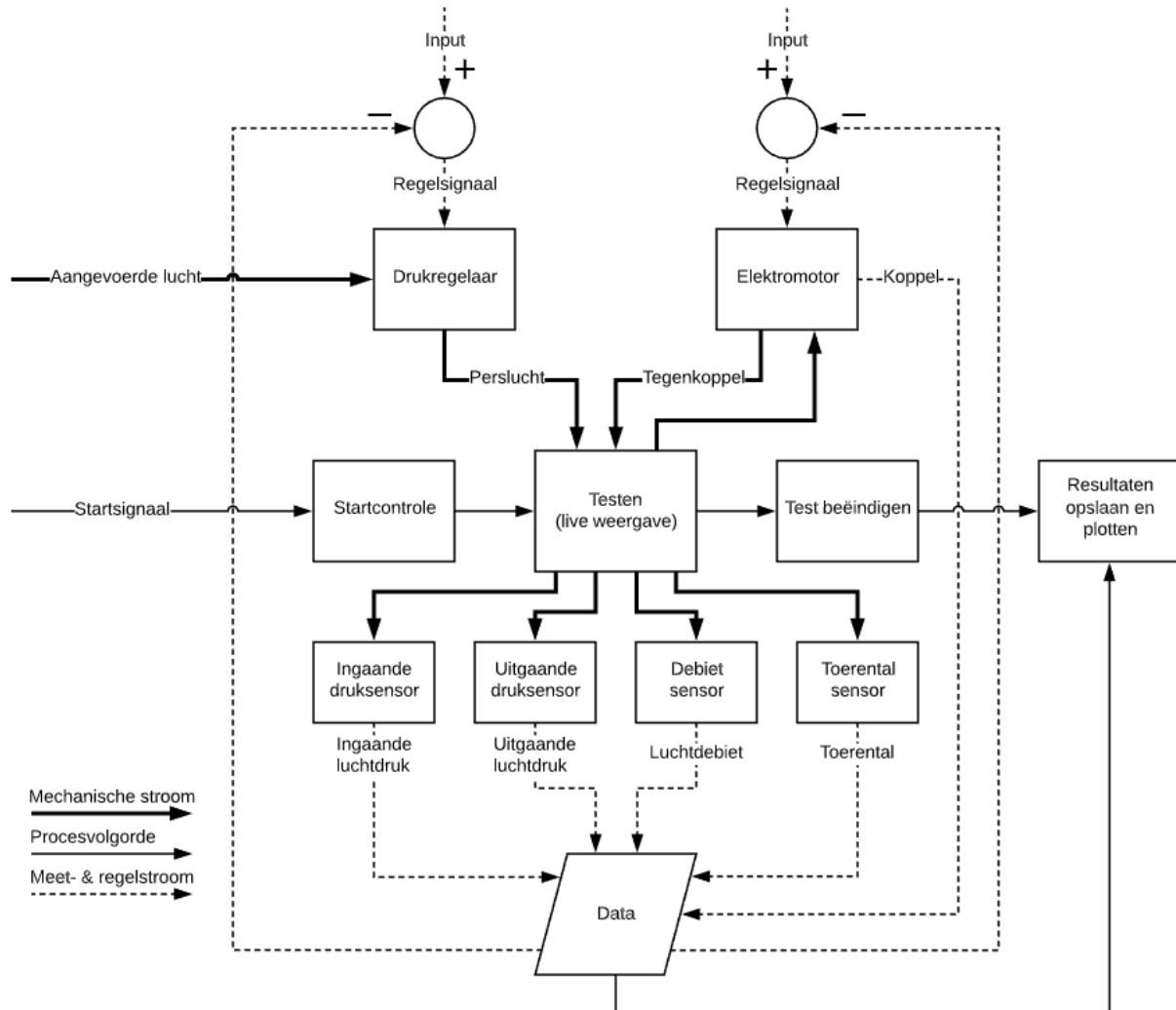
Om deze redenen wordt een lexaan, ofwel polycarbonaat, plaat toegepast. Dit heldere type plaatmateriaal wordt veelvuldig op maat verkocht en biedt een goede sterkte en slagvastheid. De plaat wordt ingeklemd in een aluminium houder welke met behulp van excenterhefbomen gemonteerd wordt aan T-gleufmoeren. Hierdoor kan de kap dankzij het omhoogtrekken van de handgrepen snel worden verschoven of weggedraaid wanneer toegang tot de aandrijving nodig is. Een voorbeeld van de instelbaarheden van de beschermkap wordt getoond in figuur 13.

Tekeningen van zowel de montagebeugel als beschermkap worden weergegeven in Bijlage J.2 en J.3.

6.4 Ontwerpschema's

6.4.1 Processtromen

Om de processtromen van het systeem te verduidelijken is een stroomschema getekend. Dit schema, weergegeven in figuur 14, toont de mechanische - en datastromen binnen het systeem wanneer in werking.

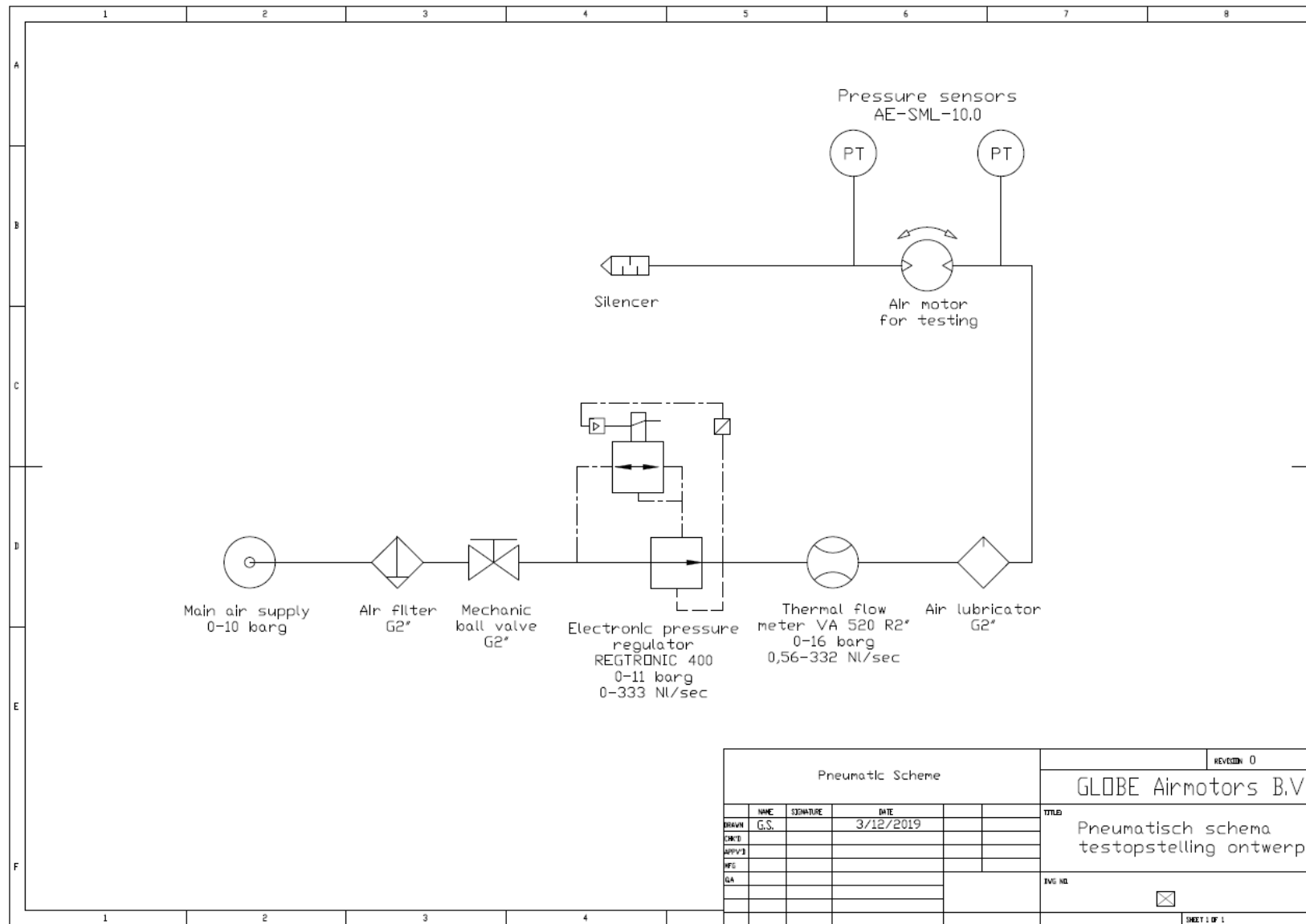


Figuur 14: Processtromen binnen de meetopstelling.

Tijdens het selecteren en starten van een testprogramma zal een signaal gezonden worden waardoor het programma in werking treedt. Binnen het schema wordt gedeeltelijk de geprogrammeerde besturing weergegeven, namelijk het DAQ-systeem wat de data verzameld en waar nodig terugkoppelt aan de elektronische drukregelaar en elektromotor.

6.4.2 Pneumatisch schema

Van de luchtbehandeling en -transport binnen het ontwerp is een pneumatisch schema gecreëerd, welke wordt getoond in figuur 15. In dit overzicht worden de deelcomponenten van het ontwerp schematisch weergegeven, eveneens als de verbindingen hiertussen.



Figuur 15: Deelcomponenten en verbindingen van het begin van de hoofdleiding tot en met de demper.

6.5 Kostenprijscalculatie

De kosten van alle productie- en kooponderdelen worden gesommeerd in tabel 6.7. Een aantal onderdelen zullen niet behandeld worden, aangezien deze reeds in bezit zijn. Dit betreft:

- Buisdelen/koppeling volgens ISO 49/EN 10242
- Gevlochten luchtslangen
- Bevestigingsartikelen
- Montagebeugels van de testmotoren
- Het lagerhuis 'UCFC212', inclusief bijbehorende montagebeugel
- De twee wandklemmen
- De luchtfilter met aansluitingen G2"
- De olieverniveelaar met aansluitingen G2"
- Dempers

Tabel 6.7: Kosten calculatie van productie- en kooponderdelen, afkomstig van het definitieve ontwerp.

Component	Prijs (excl. BTW)	Qty	Totaalprijs (excl. BTW)
Programmeren systeem, inclusief: - Ombouwen elektromotor - Inbouwen encoder - Hardware incl. controlepaneel	€12.500,-	1	€12.500,-
Druksensor AE-SML-10.0 G1/4"	€135,-	2	€270,-
Klemhefboom K0120.320x50	€28,36	2	€56,72
Bracket-mount Sg160L-4	€250,-	1	€250,-
T-slot plaat 1300x600x50, gleufbreedte 22	€2.500,-	1	€2.500,-
Lexaan beschermkap	€76,90	1	€76,90
Excenterhefboom K0005.2501110x50	€6,49	2	€12,98
Beschermkap monteerframe	€325,-	1	€325,-
Balgkoppeling BKL Series 300 L109 D42-D28	€261,-	1	€261,-
Kogelkraan, type 100 G2"	€46,80	1	€46,80
Flowmeter VA520, inclusief: - Pijpaansluiting VA520 L475 R2"	€1.092,-	1	€1.092,-
Drukregelaar REGTRONIC 400 G2"	€1.341,19	1	€1.341,19
Pijp L400 R2"	€10,51	1	€10,51
Totaal:			€18.743,10

6.6 Toetsing PvE

Ter controle wordt het model getoetst op basis van de gestelde eisen (en wensen) uit het Programma van Eisen in tabel 2.1 in deelhoofdstuk 2.4. Of er wordt voldaan aan de eis, volledig of gedeeltelijk, wordt beschreven in de laatste kolom van de tabel.

7. Conclusie en aanbevelingen

7.1 Conclusie

Om een antwoord op de hoofdvraag te geven kan gesteld worden dat een meetopstelling voor luchtmotoren in het kader van dit project aan de volgende eigenschappen moet voldoen:

- De ingaande - en uitgaande druk, het debiet, het toerental en het koppel moet elektronisch gemeten worden. Gecombineerd moeten de meetresultaten, samenhangend in zowel het vermogen als het rendement, respectievelijk aan de gewenste nauwkeurigheid voldoen.
- Meetcomponenten worden geselecteerd aan de hand van de toepassingsomgeving en de gewenste nauwkeurigheid. Deze nauwkeurigheid, ofwel de Total Error Band (TEB), kan benaderd worden door het combineren van de sensordata, geldig voor de bijbehorende werkt temperatuur.
- Er moet een mogelijkheid zijn om montagepunten, eveneens als luchtaansluitingen, ‘in te stellen’ zodat verschillende type luchtmotoren met afwijkende aansluitmaten gekoppeld kunnen worden.
- De testmotoren moeten variabel belast kunnen worden om de karakteristieken tussen het koppel en het toerental te analyseren. Deze belasting kan worden gesimuleerd dankzij een krachtopnemer. Omdat de testmotoren ook geanalyseerd moeten worden op hun remmende werking zal deze krachtopnemer ook in staat moeten zijn om aan te drijven.

Dankzij het doorlopen ontwerpproces is een realistisch model van een meetopstelling tot stand gekomen. Dit model is in staat om luchtmotoren te testen binnen het vermogensbereik van 5kW tot en met 15kW, eveneens om deze aan te drijven, en voldoet aan de gestelde vaste eisen uit het Programma van Eisen welke wordt weergegeven in tabel 2.1 in deelhoofdstuk 2.4. Bovendien zijn er implementaties verwerkt in het model om zo veel mogelijk aan de wensen van de gebruiker te voldoen. In hoeverre de opstelling voldoet aan alle wensen zal moeten blijken uit praktische ervaringen.

7.2 Conclusie opdrachtgever

Binnen het afstudeerbedrijf groeit de focus op het nieuwe motor prototype, eveneens als de investeringen voor de ontwikkelingen en productie hiervan. Er is nog geen zekerheid dat het prototype zal functioneren zoals gewenst, wat zal moeten blijken wanneer het eerste fysieke model afgerond is. Na het verkrijgen van een functionerend model zal het ontwikkelen van een nieuw prototype met een vermogen van 50kW het nieuwe speerpunt zijn. Uit een marktonderzoek is gebleken dat er veel vraag is naar een dergelijk type. Deze wordt beoogd om toe te passen binnen de energietेरugwinning en zal op meerdere soorten gassen moeten kunnen functioneren.

Ten gevolge van de onzekerheid over het functioneren van het prototype van 10kW, en na blijk van toch functioneren de focus te richten op een soortgelijk model van 50kW, is de behoefte voor een meetopstelling voor motoren met een vermogensbereik van 5kW tot en met 15kW afgewend. Ook is het mogelijk gewonnen marktvoordeel omtrent de gelegenheid om luchtmotoren uit het huidige assortiment te meten nog onbekend. Om deze redenen zal een eenvoudig model worden gecreëerd welke in staat is om het prototype op simpelere wijze te analyseren. Wanneer positieve resultaten worden ondervonden zal het in het rapport beschreven ontwerp principe worden toegepast voor een grotere meetopstelling welke in staat is om (gas)motoren van 10kW tot en met 50kW te testen.

7.3 Aanbevelingen

De elektromotor is reeds aanwezig, net als een manueel besturingssysteem hiervan. Voor een simpelere testopstelling voor een vermogensbereik van 5kW tot en met 15 kW wordt deze beoogd weer te hergebruiken. De hoogste kosten voor de realisatie van het ontwerp bestaan uit de programmering en automatisering van de testprogramma's inclusief bijbehorende apparatuur, zie deelhoofdstuk 6.5. Hierom zal het manueel besturen van de testopstelling voordeliger zijn. Dit geldt voor de besturing van de elektromotor als voor de drukregelaar, waardoor een elektronische regelaar overbodig zal zijn. Er zal een koppelsensor nodig zijn dankzij het vervallen van het behandelde meetprincipe, eveneens als een andere toerental sensor om te communiceren met de elektromotor. Een voorbeeld van de genoemde aanpassingen komt grotendeels overeen met concept 2 uit de conceptuele fase in paragraaf 5.3.2. Ook is het gunstiger om meetgegevens eenvoudig te loggen waarna deze manueel geïmporteerd kunnen worden op een computer. Tot slot is het overbodig om de opstelling te monteren op een vlakke plaat met T-gleuven, en kan deze bijvoorbeeld geplaatst worden op een stalen balk met een H-profiel.

Na in overleg te zijn geweest met de desbetreffende leverancier blijkt dat het ontworpen meetprincipe in de toekomst toegepast zal kunnen worden voor een opstelling met een vermogensbereik tot 50kW. Indien een functioneel prototype van 10kW gerealiseerd wordt zal het model herontworpen worden.

Literatuurlijst

- Adsensys. (z.d.). *Werking thermische massa flowmeter*. Geraadpleegd op 4 september 2019, van <https://adsensys.nl/advies/werking-thermische-massa-flowmeter/>
- Applied Measurements Ltd. (z.d.). *Torque Transducers & Torque Sensors*. Geraadpleegd op 10 september 2019, van <https://appmeas.co.uk/products/torque-sensors/>
- Ashcroft. (2015 juli). *How accurate is your accuracy statement?* Geraadpleegd op 18 oktober 2019, van <https://assets.tequipment.net/assets/1/7/Ashcroft-Accuracy-Whitepaper.pdf>
- Asyiddin, N. (z.d.). *Pressure Measurement*. Geraadpleegd van http://piyushpanchal2007.mynetworksolutions.com/images/1._PRESSURE.pdf
- AZoSensors. (2015, 22 april). *Selecting the Right Rotating Torque Sensor*. Geraadpleegd op 9 september 2019, van <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=605>
- Bronkhorst. (z.d.). *Coriolis mass flow measuring principle*. Geraadpleegd op 4 september 2019, van <https://www.bronkhorst.com/int/service-support/technologies/coriolis-mass-flow-measuring-principle/>
- Circuit Globe. (z.d.). *Working Principle of a Synchronous Motor*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://circuitglobe.com/working-principle-of-synchronous-motor.html>
- Cole-Parmer Instrument Company. (2019, 13 augustus). *Flow Meter Selection Guide Table*. Geraadpleegd op 16 september 2019, van <https://www.coleparmer.com/tech-article/flowmeter-guide>
- Collins, D. (2017, 3 augustus). *Encoder resolution and accuracy: What's the difference?* Geraadpleegd op 9 september 2019, van <https://www.motioncontroltips.com/encoder-resolution-and-accuracy-whats-the-difference/>
- Danfoss Industrial Automation. (2018, 16 november). *How accurate is your sensor?* [YouTube]. Geraadpleegd op 12 oktober 2019, van <https://www.youtube.com/watch?v=gaAar94N7Hk>
- Datum Electronics. (z.d.). *Inline Torque Sensor Solutions*. Geraadpleegd op 10 september 2019, van https://datum-electronics.co.uk/our_services/inline-torque-sensor-solutions/
- Datum Electronics. (z.d.). *Torque Sensors Torque Transducers and Torque Measurement Explained*. Geraadpleegd op 9 september 2019, van <https://datum-electronics.co.uk/support/torque-sensor-selection-guide/>
- Edwards, E. (z.d.). *All About Manometers - What They Are and How They Work*. Geraadpleegd op 3 september 2019, van <https://www.thomasnet.com/articles/instruments-controls/all-about-manometers-what-they-are-and-how-they-work/>
- Electrical4U. (2019, 25 april). *Brushless DC Motors (BLDC): What Are They & How Do They Work?* Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.electrical4u.com/brushless-dc-motors/>
- Electromagnetic brake*. (2018, 30 oktober). Geraadpleegd op 18 september 2019, van https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_brake
- Engineering ToolBox. (z.d.). *Comparing Flowmeters*. Geraadpleegd op 10 september 2019, van https://www.engineeringtoolbox.com/flowmeter-selection-d_526.html

- ElProCus. (z.d.). *Difference between Single Phase & Three Phase AC Power Supply*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.elprocus.com/difference-between-single-phase-and-three-phase-ac-power-supply/>
- Emerson Flow Solutions. (2014, 17 september). *The Basics of Flow Measurement with Coriolis Meters: Part 2*. Geraadpleegd op 5 september 2019, van <https://www.flowsolutionsblog.com/blog/the-basics-of-flow-measurement-with-coriolis-meters-part-2/>
- Fargo Controls. (z.d.). *Inductive Sensor Operating Principles*. Geraadpleegd op 6 september 2019, van https://www.fargocontrols.com/sensors/inductive_op.html
- Forrister, T. (2019, 6 maart). *How Eddy Current Braking Technology Is Freeing Us from Friction*. Geraadpleegd op 19 september 2019, van <https://www.comsol.com/blogs/how-eddy-current-braking-technology-is-freeing-us-from-friction/>
- Hareendran, T. K. (2017, 20 mei). *RPM Measurement: Sensors and Techniques*. Geraadpleegd op 6 september 2019, van <https://electronicsforu.com/technology-trends/test-measurement/rpm-measurement-sensors-techniques>
- Honeywell. (z.d.). *Pressure Transducer Accuracy in Application*. Geraadpleegd op 3 oktober 2019, van https://sensing.honeywell.com/index.php?ci_id=49908
- Honeywell. (z.d.). *Ways to Measure the Force Acting on a Rotating Shaft*. Geraadpleegd op 9 september 2019, van https://measurementsensors.honeywell.com/techresources/appnotes/Pages/Ways_to_Measure_the_Force_Acting_on_a_Rotating_Shaft.aspx
- Hydraulics&Pneumatics. (2012, 1 januari). *Air Motor Selection and Sizing*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/FluidPowerAcces/Article/False/6422/TechZone-FluidPowerAcces>
- Instrumart. (z.d.). *About Tachometers / Stroboscopes*. Geraadpleegd op 6 september 2019, van <https://www.instrumart.com/MoreAboutCategory?CategoryID=5553>
- Kohmatic Korea. (2015, 29 januari). *[MEROBEL] EMP Brake [YouTube]*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.youtube.com/watch?v=bgzA4RpF13g>
- Lish, T. (2016, 2 november). *What is Total Error Band & How do You Calculate It?* Geraadpleegd op 10 oktober 2019, van <https://www.setra.com/blog/what-is-total-error-band-and-how-do-you-calculate-it>
- Low-cost koppelmetering in standaard machine-uitrusting*. (z.d.). Geraadpleegd op 10 september 2019, van <http://www.fmtc.be/downloads/Monitoring>
- Magnetic Technologies. (z.d.). *Current Controlled Electric Hysteresis Brakes*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.magnetictech.com/current-controlled-electric-hysteresis-brakes/>
- Magtrol. (z.d.). *Hysteresis Brakes and Clutches*. Geraadpleegd van http://www.electrometers.com/Assets/PDF_files/Magtrol/Dynamometers/hysteresis.pdf

- Ogura. (2017, 12 december). *Magnetic Particle Clutch* [YouTube]. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.youtube.com/watch?v=sAJwDpomQQs>
- Omega Engineering. (2018, 24 september). *Sensor Theory of Operation*. Geraadpleegd op 9 september 2019, van <https://www.omega.com/en-us/resources/sensor-theory-of-operation>
- Omega. (2019a, 17 april). *Strain Gauge*. Geraadpleegd op 9 september 2019, van <https://www.omega.com/en-us/resources/strain-microstrain>
- Omega. (2019b, 10 mei). *Flow meters*. Geraadpleegd op 5 september 2019, van <https://www.omega.com/en-us/resources/flow-meters>
- Orientalmotor. (z.d.). *Brushless DC Motor vs. AC Motor vs. Brushed Motor*. Geraadpleegd op 17 september 2019, van <https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/AC-brushless-brushed-motors.html>
- Pollefliet, J. (2007). 18.12 Stroom-, Hoekstand-, Toerentalopnemers. In *Elektronische vermogencontrole Vol.2: Elektronische motorcontrole* (6de editie, pp. 18.13-18.23). Geraadpleegd van https://books.google.nl/books?id=oaMBXU1aOn0C&printsec=frontcover&hl=nl&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Products4Engineers. (2017, 8 mei). *Wat is een flowmeter en welke soorten zijn er?* Geraadpleegd op 3 september 2019, van <https://products4engineers.nl/blog/wat-is-een-flowmeter-en-welke-soorten-zijn-er>
- Reiser, J. (2016, 9 winter). *Bourdon tube pressure gauge – functional principle*. Geraadpleegd op 3 september 2019, van <https://blog.wika.com/knowhow/bourdon-tube-pressure-gauge-functional-principle/>
- Robarts, K. (2017, 17 oktober). *Differences Between Barometers and Manometers*. Geraadpleegd op 3 september 2019, van <http://www.differencebetween.net/technology/differences-between-barometers-and-manometers/>
- Schenkelberg, F. (2017, 3 juni). *Reliability and Root Sum Squared Tolerances*. Geraadpleegd op 26 september 2019, van <https://accendoreliability.com/reliability-and-root-sum-squared-tolerances/#sta-ebook>
- Sensor Technology. (z.d.). *Optical Torque Measurement Technology*. Geraadpleegd op 10 september 2019, van <https://www.sensors.co.uk/about-us/technology/>
- Sensorland. (z.d.). *The basics of torque measurement using sensors, instrumentation and telemetry*. Geraadpleegd op 9 september 2019, van <http://www.sensorland.com/HowPage075.html>
- Shrivastava, S. (2014). *A Parametric Analysis of Magnetic Braking – The Eddy Current Brakes – For High Speed and Power Automobiles and Locomotives Using SIMULINK* (3). Geraadpleegd van <http://www.rroij.com/open-access/a-parametric-analysis-of-magnetic-braking-the-eddy-current-brakes--for-high-speedand-power-automobiles-and-locomotivesusing-simulink.pdf>
- Teesing. (z.d.). *Thermische flowmeters*. Geraadpleegd op 4 september 2019, van <https://www.teesing.com/nl/page/productinformatie/flowmeters/thermische-flowmeters>
- Theriot, C. (2019, 10 januari). *Applications for a Turbine Flow Meter*. Geraadpleegd op 5 september 2019, van <https://flowmetrics.com/applications-turbine-flowmeter/>

Tripp Lite. (2017, 30 augustus). *Single-Phase vs Three-Phase Power Explained*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://blog.tripplite.com/single-phase-vs-three-phase-power-explained/>

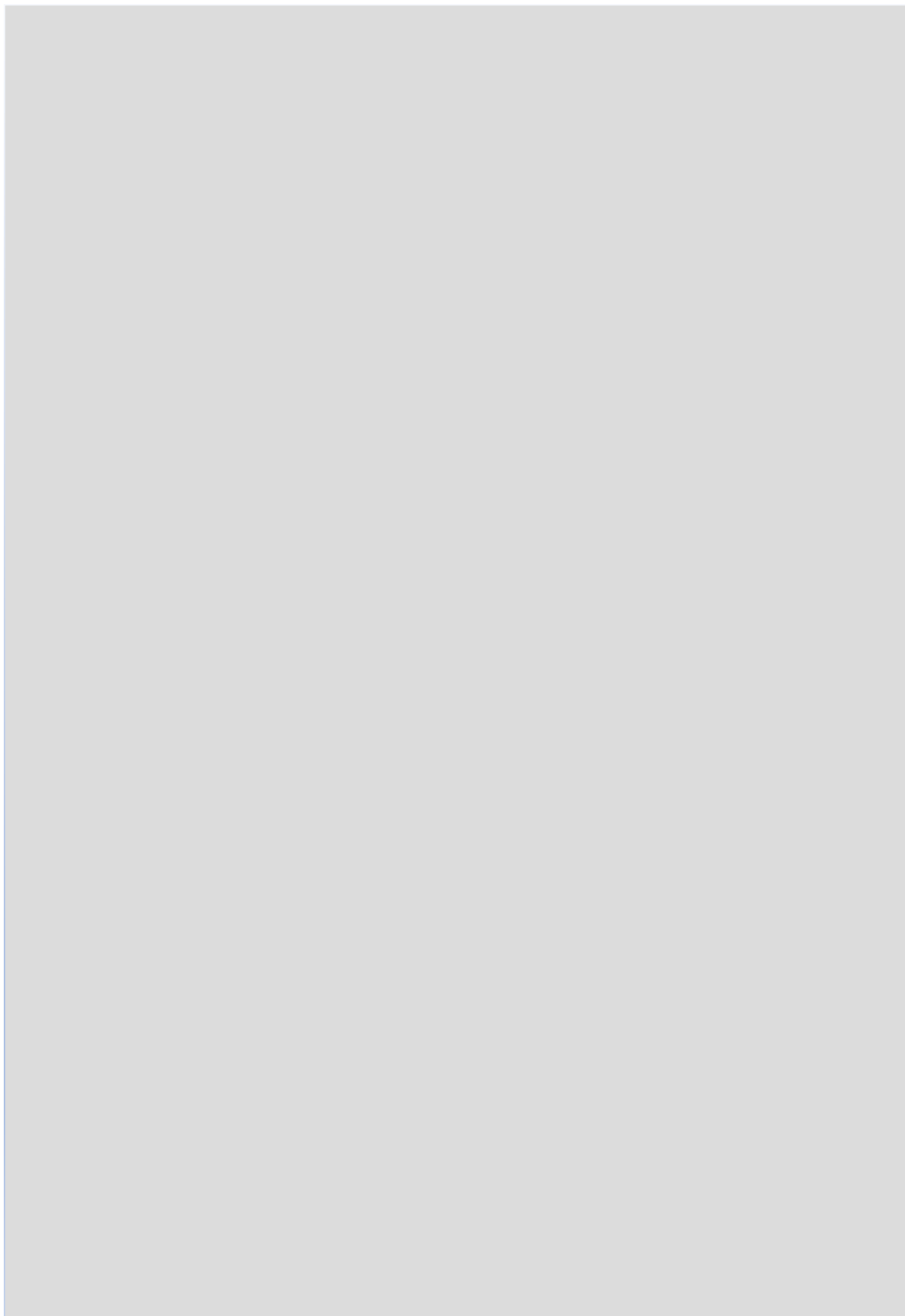
Visaya. (2018, 20 januari). *The working principle and applications of the ultrasonic flow meter*. Geraadpleegd op 5 september 2019, van <https://visaya.solutions/en/article/ultrasonic-flow-meters-basics>

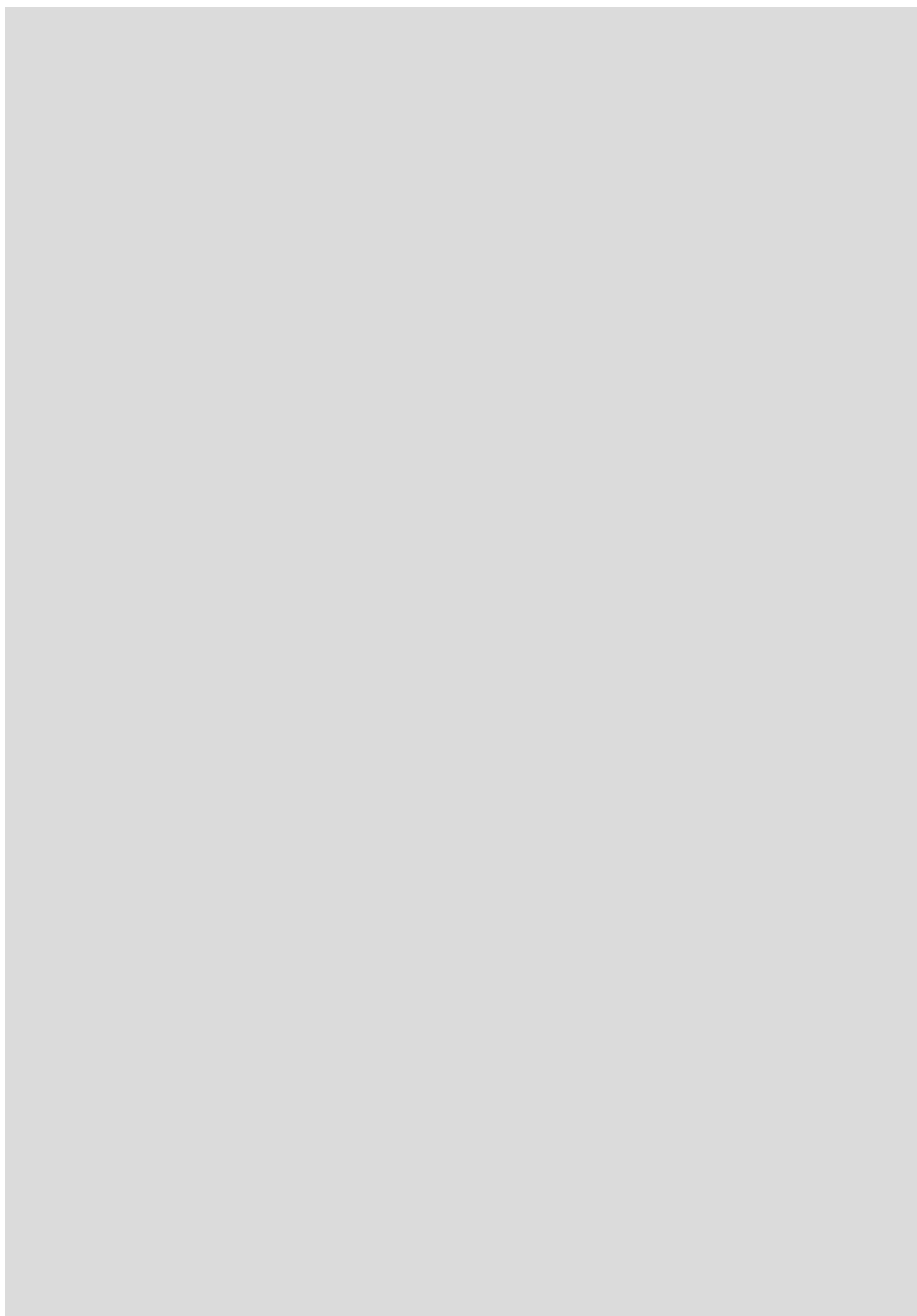
Woodford, C. (2018, 31 juli). *How do aneroid and Torricellian barometers work?* Geraadpleegd op 3 september 2019, van <https://www.explainthatstuff.com/barometers.html>

Woodford, C. (2018, 23 november). *How do eddy-current brakes work?* Geraadpleegd op 19 september 2019, van <https://www.explainthatstuff.com/eddy-current-brakes.html>

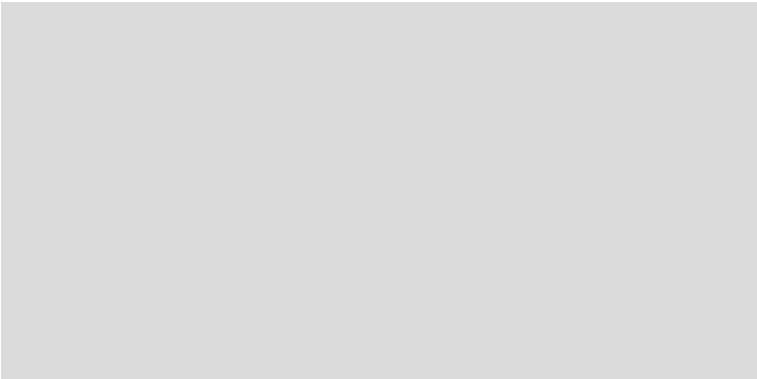
Woodford, C. (2019, 6 januari). *Induction motors*. Geraadpleegd op 18 september 2019, van <https://www.explainthatstuff.com/induction-motors.html>

Bijlage A: Bedrijfsbeoordeling





Bijlage B: Competentieverantwoording



[illegible]

Bijlage C: Onderzoek meettechnieken

Met behulp van de gewenste testbank voor luchtmotoren zullen een aantal specificaties gemeten moeten worden. Deze specificaties betreffen de ingaande luchtdruk, de hoeveelheid lucht die de motor verbruikt, het toerental van de uitgaande as en hoeveel koppel deze overbrengt. Het is van belang dat deze waardes uiteindelijk automatisch digitaal verwerkt en opgeslagen worden.

Om een beeld te krijgen hoe dergelijke technieken en instrumenten werken zal onderzocht worden wat voor werkingsprincipes er over het algemeen toegepast worden. Deze worden uiteindelijk overzichtelijk in een tabel op bepaalde parameters vergeleken.

C.1 Luchtdruk

De lucht die wordt aangevoerd naar de motor zal onder druk staan wat ervoor zorgt dat het kan expanderen binnen het motorhuis en zo de meegedragen energie kwijt kan. Om de druk van de ingaande luchtstroom te meten en controleren zijn een aantal technieken beschikbaar die doorgaans worden toegepast.

Barometer

Een barometer is een meetinstrument waarmee de druk van een gas kan worden gemeten. Over het algemeen wordt dit type meter vooral gebruikt bij het meten van luchtdruk in de omgeving. Echter zal de werking het algemene principe van druk meten nader verklaren. Er zijn een paar hoofdgroepen barometers welke in de volgende sub paragrafen worden toegelicht.

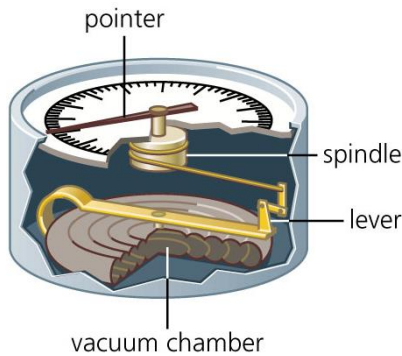
Torricellian barometer

De meest eenvoudige vorm van een barometer is de Torricellian barometer. Dit bedraagt een bad van een vloeibare stof op kamertemperatuur, vaak kwik, waarin een buis ondersteboven is geplaatst welke ook gevuld is met dezelfde stof. De druk in de atmosfeer drukt op de vloeistof in het bad waardoor de vloeistof in de buis tot een bepaald niveau komt. Wanneer de omgevingsdruk hoger wordt zal het niveau in de buis stijgen. Door middel van een meetschaal op de buis kan de bijbehorende waarde van de omgevingsdruk afgelezen worden aan de hand van het niveau van de vloeistof.

De reden dat kwik wordt gebruikt is omdat de dichtheid een stuk hoger is dan bijvoorbeeld water. Als er water gebruikt wordt in een dergelijke opstelling zal er een veel groter niveauverschil optreden waardoor het instrument een stuk groter aldus minder praktisch is.

Aneroid barometer

Een gesloten variant van de Torricellian barometer zonder vloeistof is de Aneroid barometer, zie figuur 17. Deze werkt aan de hand van een kleine luchtdichte metalen container onder vacuüm welke onder drukverschil in- en uit kan drukken. Aan dit containertje zit een veer welke ook in- en uit drukt en zo een gekalibreerde naald op een wijzerplaat kan laten bewegen. Dankzij de meetschaal op de wijzerplaat kan direct de druk worden afgelezen.



Figuur 17: Aneroid barometer werkingsprincipe. Overgenomen van College of the Environment (<https://atmos.washington.edu/academics/classes/2013Q2/101/LINKS-html/AneroidBarometer.html>). © College of the Environment.

Manometer

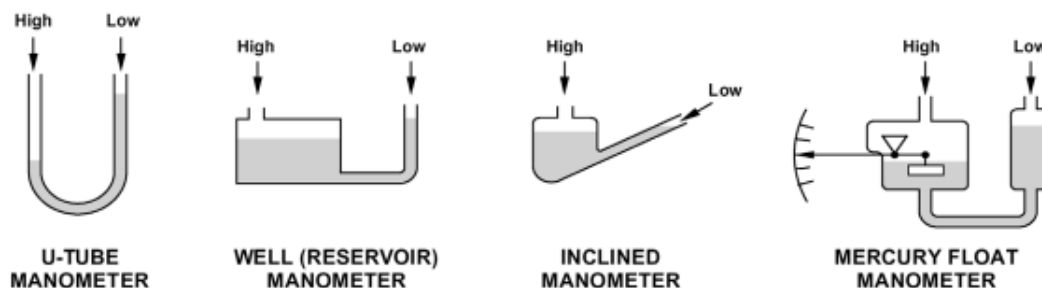
Manometers hebben over het algemeen meer diverse vormen en technieken om druk te meten dan barometers. Ook zijn deze in staat om gassen en vloeistoffen preciezer en over een veel groter bereik te meten. In de volgende sub paragrafen zullen de belangrijkste hoofdgroepen van manometers beschreven worden.

Analoge manometer

De analoge manometer maakt gebruik van een vloeistof in een U-vormige buis en rust op het principe van een hydrostatisch evenwicht. Wanneer één van de uiteinden van de buis onder druk komt te staan zal hier het niveau dalen, en in het overstaande buisgedeelte het niveau stijgen. Aan de hand van het hoogteverschil tussen beide verticale buisdelen kan de hoeveelheid aanwezige druk worden bepaald. Dit werkingsprincipe lijkt grotendeels op die van een Torricellian barometer.

Door middel van één van de twee verticale stukken buis hellend op te stellen kan een hoger niveauverschil opgemerkt worden bij dezelfde druk toegepast in een opstelling met twee verticale buizen. Dankzij deze opstelling kan dus een hogere meetresolutie worden gerealiseerd bij een kleiner bereik.

Er zijn meerdere type opstellingen van analoge manometers met mogelijk verscheidene aanwezige vloeistoffen en/of gassen voor verschillende meetbereiken, resoluties en omgevingstemperaturen. Een aantal voorbeelden van verschillende opstellingen worden weergegeven in figuur 18.

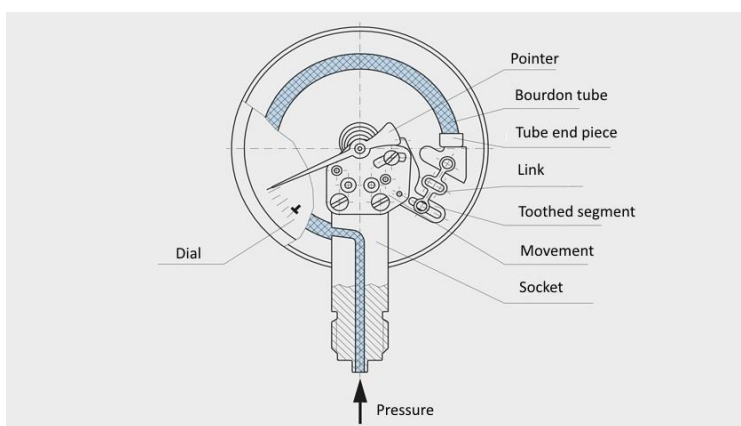


Figuur 18: Verschillende opstellingen van analoge manometers. Overgenomen van N. Asyiddin (http://piyushpanchal2007.mynetworksolutions.com/images/1._PRESSURE.pdf). © N. Asyiddin.

Industriële analoge manometer

Voor de industrie zijn een heleboel verschillende analoge manometers, bestaande uit veren, diafragma's, gassen, vloeistoffen en combinaties hiervan. De meest gebruikte manometer in de industrie is de Bourdon manometer, zie figuur 19. Dit type manometer maakt gebruik van een ovale buis welke in een C-vorm opgesteld staat wat dient als een veer. Zodra er een vloeistof of gas onder druk in de buis terecht komt zal deze onder spanning komen te staan en vervormen. Bij een hogere druk dan atmosferische druk zal de radius van de buis groter worden en de wijzer laten bewegen. Er zijn ook varianten die bij een lagere druk dan atmosferische druk de radius van de buis kan verkleinen om de wijzer de andere kant op te laten draaien.

Wanneer de te meten druk erg hoog is zal de vorm, eveneens als het materiaal en de wanddikte van de buis aangepast moeten worden. Voor hoge druk wordt vaak een spiraalvormige buis toegepast.



Figuur 19: Interne weergave van een Bourdon manometer. Overgenomen van WIKA (<https://blog.wika.com/knowhow/bourdon-tube-pressure-gauge-functional-principle/>). © WIKA.

Digitale manometer

In een digitale manometer moet de druk van een gas of vloeistof omgezet worden naar een elektrisch signaal, wat gebeurt door middel van een transducer welke de energievorm van mechanisch naar elektrisch kan omzetten. Het elastische gedeelte binnen de transducer raakt onderhevig aan de aanwezige druk waardoor het vervormt. De vervorming wordt uiteindelijk omgezet en gekalibreerd tot een bruikbare waarde.

Digitale manometers hebben een hoop voordelen ten opzichte van analoge varianten, namelijk dat deze veel nauwkeuriger en sneller meten, vaak minder wegen, zo goed als geen bewegende onderdelen bevatten en geen vloeistoffen nodig hebben om te functioneren. Bovendien kunnen ze met behulp van software uitgelezen worden en eventuele meetafwijkingen hierin gecorrigeerd worden.

Er zijn een aantal verschillende soorten digitale transducers. Over het algemeen geven deze werkingsprincipes in een manometer hetzelfde resultaat maar zullen er wat verschillen zijn in resolutie en toepasbare omgevingsfactoren.



Figuur 20: Additel 681 digitale manometer. Overgenomen van Eurotron (<https://www.eurotronbenelux.nl/product/additel-681-digitale-manometer-met-datalogger/>). © Eurotron.

Gecombineerde manometer

Het is mogelijk om een analoge of digitale manometer te voorzien van een transducer waardoor deze ook signalen als output kan genereren. Hierdoor kan analoog / digitaal een waarde afgelezen worden en wordt tegelijkertijd een signaal afgegeven als output. Met dit signaal kan bijvoorbeeld bijgehouden worden wat de gemeten druk was binnen een bepaalde tijd, of kan het systeem automatisch afgesloten worden wanneer een kritische waarde wordt bereikt.

Druktransmitter

Een druktransmitter heeft hetzelfde werkingsprincipe als een digitale manometer, behalve dat deze geen waarde zal laten zien op locatie. Ze komen in allerlei vormen en werken op basis van verschillende technieken. Het signaal wat gegenereerd wordt in de transmitter zal verder verwerkt moeten worden tot een leesbare waarde. Meestal worden druktransmitters gebruikt wanneer er niemand aanwezig zal zijn op locatie van de meting en de gegevens van dergelijke metingen worden verzameld op afstand.

Vergelijkingstabel druk meettechnieken

Tabel C.1: Vergelijkingstabel van meettechnieken omtrent luchtdruk, relatief ten opzichte van elkaar. '+' geeft positieve eigenschappen aan, en '-' negatieve.

	Precisie	Complexiteit inbouw	Elektrisch	Onderhouds- gevoeligheid	Reproduceer- baarheid	Opmerkingen
Torricellian barometer	–	N/b	Nee	N.b.	–	Bedoeld voor atmosferische druk.
Aneroid barometer	+	N/b	Nee	N.b.	+	Bedoeld voor atmosferische druk en hoogte.
Analoge manometer	–	–	Nee	N.b.	–	
Indust. analoge manometer	+	++	Nee	N.b.	+	
Digitale manometer	++	++	Ja	N.b.	++	Werkt meestal met behulp van batterijen.
Gecombineerde manometer	++	+	Ja	N.b.	++	Bedraagt een combinatie van een industriële analoge manometer en druktransmitter.
Druktransmitter	++	+	Ja	N.b.	++	Geeft alleen een elektrisch signaal wat verder verwerkt moet worden.

Overige opmerkingen:

- Vergelijkingen zijn relatief ten opzichte van elkaar en zijn geschat aan de hand van beschikbare informatie en eigen kennis, en dient als hulpmiddel bij het kiezen van een meettechniek.
- Geen informatie bekend over onderhoudsgevoeligheid.
- Barometers niet bruikbaar in industriële toepassing.

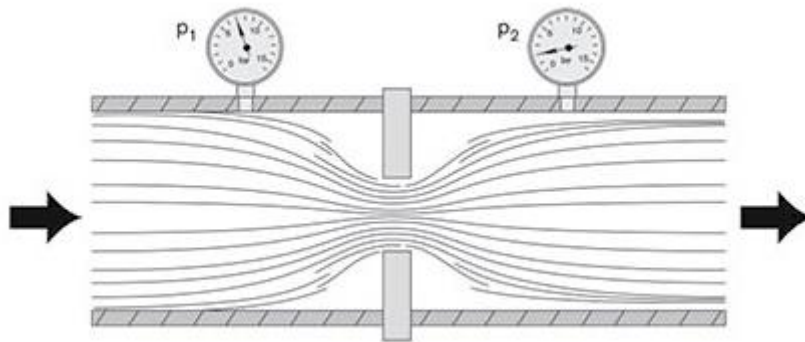
C.2 Debiet

Wanneer de doorstroming van een gas of vloeistof per tijdseenheid gemeten moet worden kan een debietmeter als meetinstrument toegepast worden. Hiervoor zijn een hoop verschillende technieken beschikbaar welke in dit hoofdstuk nader worden verklaard.

Aangezien de motoren op lucht werken worden technieken waarvan het werkingsprincipe alleen gebaseerd is op vloeistoffen achterwege gelaten.

Verschildruk flowmeter

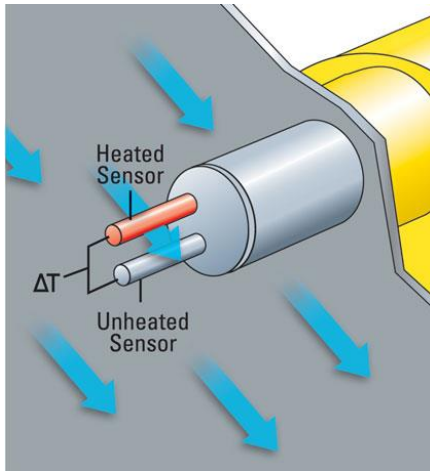
Door middel van een restrictie in bijvoorbeeld een leiding ontstaat een drukverschil, zoals weergegeven in figuur 21. Het drukverschil dat over deze restrictie wordt gemeten is evenredig met het debiet van de gas of vloeistof. Dit is een eenvoudige manier om debiet te meten en is toepasbaar in vele maten en situaties met extreme omgevingsfactoren. Echter door het toepassen van een restrictie zal er energieverlies ontstaan.



Figuur 21: Drukverschil door vernauwing in een leiding. Overgenomen van Keller (http://www.keller-druck.com/home_e/panews_e/news_2013_10_e.asp). © Keller.

Thermische flowmeter

Een thermische flowmeter voert een bekende hoeveelheid warmte toe naar een verwarmingselement. Wanneer hier een medium langs stroomt zal een deel van deze warmte-energie hieraan overgedragen worden. Door een tweede temperatuurmeting te doen kan de sensor berekenen hoeveel warmte-energie verloren is gegaan en wat de flow van het medium is. De meest toegepaste variant van een thermische flowmeter is de immersie flowmeter, wat een insteeksensor is die zich in een leiding of een kanaal bevindt.



Figuur 22: Het meten van flow door middel van temperatuurafgifte. Overgenomen van Fluid Components (<https://modernpumpingtoday.com/thermal-mass-flow-meter-delivers/>). © Fluid Components.

Voor kleine debieten wordt een bypass flowmeter gebruikt. Dit bestaat uit een laminair flow element (LFE), waardoor het stromende gas een laminaire stroming wordt voordat het door de sensor stroomt. Parallel aan de sensor is een bypass, en aangezien de stromende lucht in zowel de bypass als sensor laminair is zorgt dit voor een constante verhouding van massastroming. Hierdoor is de meting van een temperatuurverschil aldus de flow binnen de sensor representatief voor wat door het gehele apparaat stroomt.

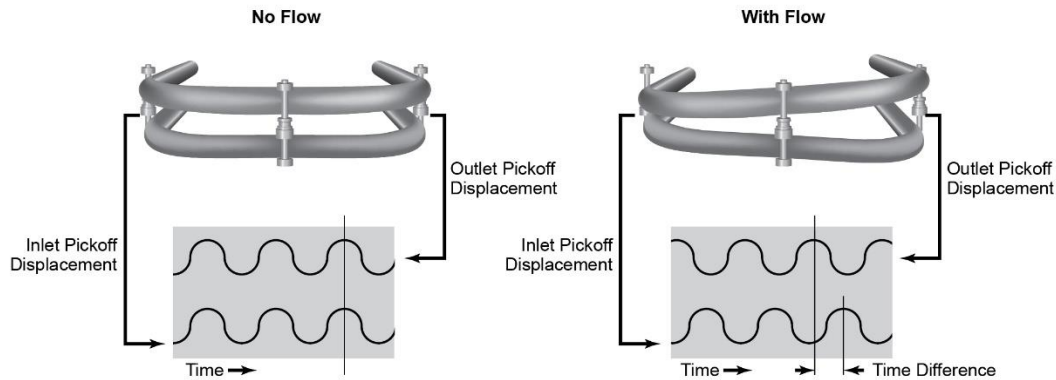
Deze manier van flow meten wordt minder nauwkeurig als het te meten medium deels van samenstelling veranderd of als het bijvoorbeeld druppels vocht bevat. Bij pure gassen is het echter een nauwkeurige en eenvoudige meetmethode.

Coriolis massaflowmeter

Een Coriolis massaflowmeter bestaat uit één of meerdere buisjes welke in trilling worden gebracht. De trilling is symmetrisch tot er een medium door stroomt, waardoor de trilling veranderd dus een reactiekracht aanwezig is. Deze kracht zorgt ervoor dat de buizen als het ware gaan golven.

Wanneer er geen flow aanwezig is zullen de trillende buizen een gelijke frequentie hebben, zie figuur 23. Zodra een medium gaat stromen en de buizen gaan golven zullen de frequenties uit ritme lopen. Hoe groter de massastroom is des te verder deze frequenties uit elkaar geraken. Dit frequentieverschil is evenredig met de massaflow en is hetgeen wat gemeten wordt in een dergelijke opstelling. Aan de hand van temperatuurgegevens en gegevens van het medium wordt berekend wat de aanwezige massastroom is.

Coriolis flowmeters komen in vele vormen en maten, elke met voor- en nadelen. Aan de hand van de toepassing en kenmerken van het medium kan de juiste opstelling gekozen worden.



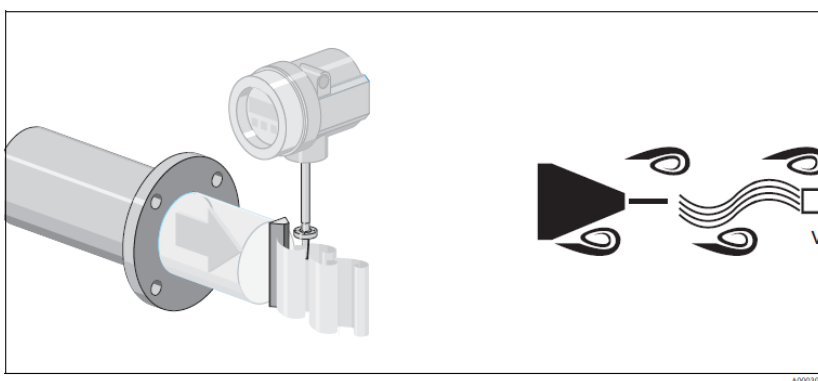
Figuur 23: Werkingsprincipe van een Coriolis flowmeter. Overgenomen van Emerson Flow Expert (<https://www.flowsolutionsblog.com/blog/the-basics-of-flow-measurement-with-coriolis-meters-part-2/>). © Emerson Flow Expert.

Vortex flowmeter

Een vortex flowmeter splitst een stroom van een gas of vloeistof in meerdere stromingen welke dankzij de vorm van de splitsing een wervelende eigenschap krijgen. De afstand tussen- en de kracht van deze wervelende stromingen is constant en alleen afhankelijk van hetgeen wat de hoofdstroom heeft doen splitsen.

Tussen deze wervelende stromen kan zich een oscillerend onderdeel bevinden wat verbonden is aan een sensor. Dit onderdeel zal oscilleren door de wervelingen die hierlangs stromen. Rond het object wat de stroming splitst kan één of meerdere druksensoren bevatten die de drukfluctuaties meten. Deze fluctuaties hebben dezelfde frequentie als het oscillerende onderdeel tussen de stromingen. Het is mogelijk dat het debiet van de stroming met alleen druksensoren wordt gemeten. Ook kan een temperatuursensor aanwezig zijn. Deze combinaties van sensoren kunnen samenwerken voor een hogere nauwkeurigheid en compenseren voor een lage stroomsnelheid.

Bij een te lage stroomsnelheid zullen de ontstane wervelingen onregelmatig en zwak kunnen zijn waardoor de nauwkeurigheid van de meting laag is. Over het algemeen geldt dat een hogere snelheid leidt tot de meest accurate metingen. Hierom zijn ook veel vortex flowmeters die geïnstalleerd zijn in een systeem kleiner dan de algemene leidingdiameter om een hogere stroomsnelheid te behalen.

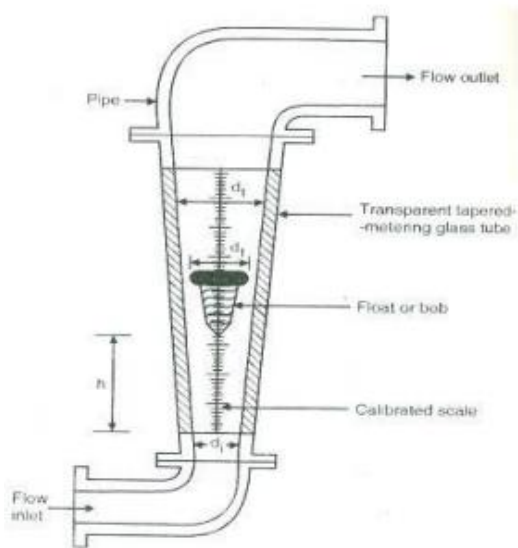


Figuur 24: Werkingsprincipe van een vortex flowmeter. Overgenomen van Endress+Hauser (https://portal.endress.com/wa001/dla/5001109/7297/000/04/FA00005DEN_1918.pdf). © Endress+Hauser.

Variable area flowmeter

Met behulp van een variable area flowmeter (VA meter), of een vlottermeter, kan het debiet van zowel gasen als vloeistoffen eenvoudig en relatief goedkoop gemeten worden. Een dergelijke meter bestaat uit een conische buis met een vlotter. De vlotter wordt dankzij de stroming door de buis geduwd. Omdat de buis conisch is veranderd de grootte van de opening tussen de vlotter en de binnenwand van de buis naarmate deze verder wordt geduwd. Bij een bepaald debiet zal de vlotter op de bijbehorende positie in balans zijn. In figuur 25 is de meest eenvoudige opstelling te zien waarbij de zwaartekracht die op de vlotter wordt uitgeoefend van belang is om het systeem te laten werken. Ook zijn er systemen die gebruik maken van een veer in plaats van zwaartekracht, eveneens met magneten in de vlotter verwerkt om een elektronisch een meetwaarde af te kunnen lezen.

Voor vloeistoffen is dit een veelgebruikte meettechniek. Bij gasen zal een VA-meter voor de bedoelde omstandigheden gekalibreerd moeten worden en is een constante druk van belang als er nauwkeurige metingen gedaan moeten worden. Dit betekent ook dat tegendruk tot een ongeldige meting kan leiden.



Figuur 25: Voorbeeld van een verticaal opgestelde variable area flowmeter. Overgenomen van <https://electronics2electrical.com/16766/>.

Turbine flowmeter

Dit meetprincipe is gebaseerd op het plaatsen van een turbine binnen in een behuizing of leiding. Wanneer er stroming van een gas of vloeistof plaatsvindt zal de turbine draaien, en zodra de stroming groter wordt zal dit eveneens de rotatiesnelheid van de turbine verhogen. Uit de rotatiesnelheid van deze turbine kan bepaald worden wat de stroomsnelheid is van het medium. Aan de hand van deze snelheid en de overige parameters van het medium kan het debiet bepaald worden.

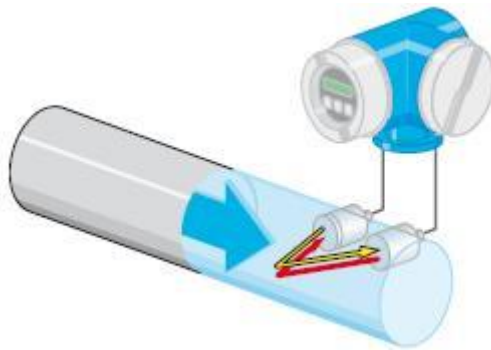
Over het algemeen doen alle type turbine flowmeters hetzelfde en zitten de verschillen met name in de vorm van de turbine en de opbouw van het geheel in het algemeen, met name afhankelijk van het soort medium. Het bereik en de precisie van de meting zal eveneens afhankelijk zijn van het type wat wordt gekozen.

Ultrasonische flowmeter

Wanneer een ultrasonische flowmeter gebruikt wordt zijn er twee technieken beschikbaar, namelijk het doppler- en looptijdverschil werkingsprincipe. Een ultrasonische flowmeter die werkt op basis van het doppler principe kan alleen bij toepassingen met vloeistoffen worden gebruikt en wordt niet verder behandeld.

Bij een ultrasonische flowmeter gebaseerd op het looptijdverschil worden geluidsgolven schuin gezonden door het medium, zowel tegen de stroom in als met de stroom mee, zie figuur 26. De reden dat het geluid beiden kanten wordt opgestuurd is omdat het sneller zal bewegen met de stroom mee ten opzichte van tegen de stroming in. Het verschil in tijd dat het kost om de golven weer te ontvangen bepaald wat de stroomsnelheid van het medium is.

De grootste redenen dat deze meettechniek zo populair is zijn dat er geen obstructies aanwezig zijn in het leidingwerk en dat het principe niet afhankelijk is van een hoop factoren, zoals druk of temperatuur. Bovendien is het mogelijk om vanaf een stilstaande stroming al te meten en kan dit relatief nauwkeurig, met name wanneer er meerdere sensoren worden opgesteld.



Figuur 26: Weergave van ultrasonische meter op basis van looptijd. Overgenomen van Endress+Hauser (https://portal.endress.com/wa001/dla/5001109/7297/000/04/FA00005DEN_1918.pdf). © Endress+Hauser.

Vergelijkingstabel debiet meettechnieken

Tabel C.2: Vergelijkingstabel van meettechnieken omtrent debiet, relatief ten opzichte van elkaar. '+' geeft positieve eigenschappen aan, en '-' negatieve.

	Precisie	Complexiteit inbouw	Medium	Type flow	Onderhouds- gevoeligheid	Reproduceer- baarheid	Opmerkingen
Verschuldruk flowmeter	+	+	Gas/ Vloeistof	Massa/ Volume	+	+	Restrictie zorgt voor relatief grote drukverlaging. Eenvoudig concept.
Thermische flowmeter	+	++	Gas(+)/ Vloeistof(-)	Massa	+	+	Voor hoge precisie moet de samenstelling van het medium constant zijn.
Coriolis massaflowmeter	++	–	Gas/ Vloeistof(+)	Massa	++	+	Vooral hoge precisie bij vloeistoffen. Met name bedoeld voor chemische vloeistoffen.
Vortex flowmeter	+	+	Gas/ Vloeistof	Massa/ Volume	+	+	Hoge reproduceerbaarheid en precisie bij hoge stroomsnelheid. Algemene richtlijn: Re>10.000
Variable area flowmeter	–	+	Gas(-)/ Vloeistof(+)	Volume	+	–	Gassen zijn lastig te meten. Meestal analoge meetwaarden.
Turbine flowmeter	+	++	Gas/ Vloeistof(+)	Stroom- snelheid	–	++	Ongeschikt voor hoge viscositeit van medium. Sterk fluctuerende flow moeilijk te meten, eveneens als lage flow.
Ultrasone flowmeter	+	+	Gas/ Vloeistof	Stroom- snelheid	++	++	Precisie afhankelijk van aantal sensoren. Geen restricties aanwezig. Onafhankelijk van medie-eigenschappen.

Overige opmerkingen:

- Vergelijkingen zijn relatief ten opzichte van elkaar en zijn geschat aan de hand van beschikbare informatie en eigen kennis, en dient als hulpmiddel bij het kiezen van een meettechniek.
- Alle aangegeven technieken zijn toepasbaar voor zowel gassen als vloeistoffen. De algemene geschiktheid daarentegen wordt aangegeven met '+' en '-'.

C.3 Toerental

Het toerental van de uitgaande as zal tijdens het testen van de motoren bijgehouden moeten worden. Een aantal technieken zijn beschikbaar om het toerental te meten en zijn altijd gebaseerd op het gebruik van sensoren.

Digitale hand tachometer

Een hand tachometer is een instrument om met de hand het toerental van een roterend object te kunnen meten. Dit apparaat heeft bijna altijd meerdere functies, namelijk op mechanische maar ook optische wijze.

Met betrekking tot het mechanische meetprincipe zal er een contactschijf of -punt op een uitgaande as van de meter geplaatst kunnen worden. De schijf kan bijvoorbeeld tegen een as gehouden worden zodat deze meedraait. Voor de punt geldt dat deze in een gat aan het eind van een as gestoken kan worden. De as van de tachometer zal meedraaien met het roterende object wat in het apparaat zorgt voor pulsen per omwenteling, welke worden omgezet in een afleesbaar toerental.

Vaak hebben tachometers ook een optische meetfunctie wat werkt met behulp van een stroboscoop of een laser. Deze functies worden over het algemeen vaak toegepast bij het meten van een toerental, ook zonder hand tachometer. Informatie over deze optische meettechnieken is onderverdeeld in de paragraaf met betrekking tot optische sensoren.

Optische sensor

Met behulp van lichtbronnen kan op eenvoudige wijze van een afstand iets gedetecteerd worden, zoals een reflectief materiaal. Op basis van dit werkingsprincipe kan op een hoop verschillende manieren een toerental gemeten worden. De volgende paragrafen beschrijven een aantal technieken die gebaseerd zijn op het meten van toerentallen.

Infrarood

Het werkingsprincipe van een, in dit geval infrarood (IR) laser, voor het meten van een toerental is eenvoudig. Een laser wordt gericht op een roterend object en zendt pulserende lichtbundels uit. Deze lichtbundels moeten weer reflecteren zodat een sensor de lichtbundel weer kan opvangen. Om dit te realiseren wordt bijvoorbeeld een stuk reflecterend tape op een as geplakt waardoor elke rotatie de lichtbundel eenmalig wordt gereflecteerd. Aan de hand van de frequentie in hoeverre deze lichtbundels teruggekaatst worden kan een toerental berekend worden. Wanneer er meer reflectiemiddelen per rotatie aanwezig zijn zal de resolutie van het berekende toerental nauwkeuriger zijn.

Deze techniek wordt vooral gebruikt in gevallen waarbij het te meten roterende object niet of moeilijk bereikbaar is en er op afstand gemeten moet worden. Het is van belang dat het reflectiemateriaal niet vuil of beschadigd kan worden, aangezien dit de mogelijkheid om de lichtbundel te reflecteren kan beletten.

Ook kan een lichtbron die infrarood licht uitstraalt zo worden gepositioneerd voor een gekoppelde schijf aan de as welke open en dichte segmenten heeft. Aan de andere kant van de schijf moet een sensor geplaatst worden die de lichtbundel kan detecteren. Wanneer de schijf draait en een opening voor de laser komt zal de sensor de lichtbundel detecteren. Aan de hand van een bepaalde hoeveelheid detecties per rotatie zal een toerental berekend kunnen worden. Dit is bovendien ook mogelijk met andere soorten lichtbundels.

Stroboscoop

Een stroboscoop zendt lichtflitsen uit in een bepaalde frequentie welke in de meeste gevallen variabel in te stellen is. Dit instrument wordt gebruikt om roterende objecten voor het menselijke oog langzaam draaiend of stil te laten staan. Zodra de frequentie van de lichtflitsen overeenkomt met de draaifrequentie van het roterende object lijkt het alsof het object niet beweegt. Het is van belang dat er een referentiepunt op het draaiende object is geplaatst of getekend. Als het object volledig symmetrisch is kan niet worden geconstateerd of deze beweegt of stilstaat.

De stroboscoop is vooral nuttig voor het meten van een toerental op één moment. Het bijhouden van een toerental met verloop van tijd zal niet mogelijk zijn aangezien de frequentie van de lichtflitsen constant aangepast moet worden tot deze overeen komt met de draaifrequentie. Deze meettechniek wordt vaak gebruikt om draaiende onderdelen te controleren in machines zonder deze uit te hoeven schakelen.

Nabijheid sensor

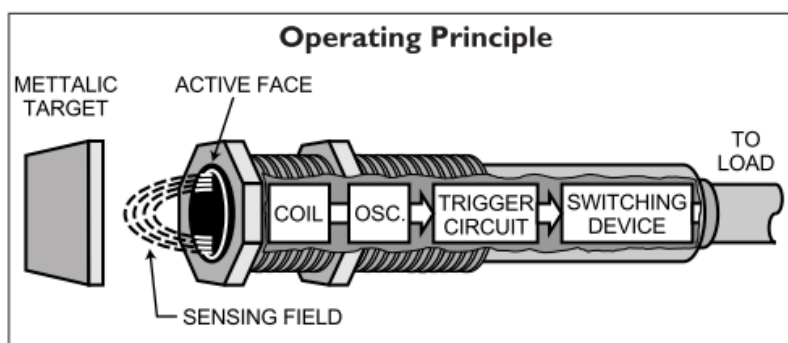
Deze type sensoren zullen een object of een bepaald materiaal als het ware aan kunnen voelen, mits wordt voldaan aan de maximale afstand en materiaalkeuze. In de volgende sub paragrafen worden meettechnieken beschreven welke op basis van nabijheid sensoren functioneren en op de juiste wijze een toerental kunnen meten.

Inductief

Het toerental van een roterende massa wordt in producten en machines vaak gemeten met behulp van inductieve sensoren. Deze sensoren creëren een magnetisch veld rond het detectieoppervlak welke verstoord wordt dankzij een metalen object. Bij een dergelijke verstoring ontstaat een wervelstroom wat het magnetisch veld dempt. Dankzij deze demping wordt aan de hand van het type sensor een signaal afgegeven of juist onderbroken. Hoe dichterbij het object zich bevindt bij de sensor hoe groter dit signaal zal zijn.

Er is een onderscheid tussen bondige en niet-bondige inductieve sensoren. Bondige sensoren detecteren metalen objecten recht voor het detectieoppervlak met een lager schakelafstand (zie figuur 27), terwijl niet-bondige sensoren dit rondom het vlak kan. Naar mate de geleid- en doordringbaarheid van het materiaal groter zijn zal de schakelafstand van de sensor afnemen.

Wanneer er bijvoorbeeld een tandwiel aan een as, waar het toerental van gemeten moet worden, gekoppeld wordt kan er een inductieve sensor loodrecht op de tanden worden gemonteerd. De sensor zal bij elke tand die hij detecteert een signaal afgeven waarmee uiteindelijk het toerental berekend kan worden.



Figuur 27: Werkingsprincipe van een bondig inductieve nabijheid sensor. Overgenomen van A. Albagul en M. Saad (https://www.researchgate.net/publication/277775104_Design_and_Fabrication_of_an_Automated_Multi-level_Car_Parking_System). © A. Albagul en M. Saad.

Capacitief

Een capacitieve sensor werkt ongeveer hetzelfde als een inductieve, behalve dat deze elk materiaal kan detecteren. Dit type sensor reageert niet op een onderbreking van een magnetisch veld maar een verandering van de capaciteit van de aanwezige condensator, wat kan gebeuren door zowel metalen als andere materialen.

De meest gebruikelijke toepassing van dit type sensor is om te meten hoe vol een container is of welk vloeistofniveau er in een bepaalde tank zit.

Bij dit type sensor geldt ook dat er een bondige en niet-bondige variant beschikbaar is. Ook zal er een verschil zijn in schakelafstand bij verschillende materialen.

Magnetisch

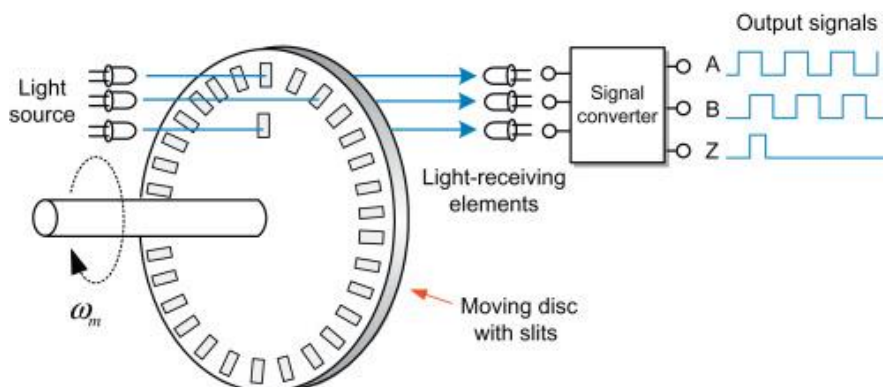
In het lijstje van nabijheid sensoren zit ook de magnetische sensor. Deze sensor werkt bijna hetzelfde als een inductieve sensor, behalve dat hij sterk reageert op de aanwezigheid van een magneet. Hierom is de detectiegevoeligheid en dus ook de schakelafstand een stuk hoger dan die van inductieve en capacitieve sensoren.

Van dit type sensor bestaan ook de opties om een bondige of niet-bondige variant te gebruiken. Ook komt penetratie van andere materialen om de magneet te detecteren aan bod, eveneens als aanwezigheid van magnetiseerbare materialen rondom. Dit zijn allemaal factoren die invloed hebben op de schakelafstand van de sensor.

Incrementele encoder

Een encoder wordt over het algemeen gebruikt om een lineaire of roterende beweging om te zetten in een signaal, wat kan worden gebruikt voor het verkrijgen van meetwaarden of om een systeem nauwkeurig te besturen. Incrementele encoders zijn meetapparaten die positieverschillen van een roterend object zoals een as kunnen detecteren. Met de meetwaarden die de encoder in dit geval geeft kan deze as een exact gewenste rotatie maken. Buiten het meten van de positionering van een as is het ook eenvoudig om een toerental te meten aan de hand van rotatieverschillen. Per rotatie worden een aantal pulsen gegenereerd (wat bij sommige types wel 10.000 pulsen per revolutie kan bedragen) welke in dit geval gebruikt kunnen worden om een toerental te berekenen.

Incrementele encoders kunnen mechanisch, optisch en magnetisch werkingsprincipe hebben. De optische en magnetische varianten kunnen over het algemeen de hoogste snelheden aan en meten op de hoogste nauwkeurigheid. Vaak is de gewenste nauwkeurigheid aan te vragen bij de desbetreffende leverancier. Verder zijn er uitvoeringen met uitgaande of holle as en diverse stekkeruitgangen om in veel verschillende situaties ingebouwd te kunnen worden.



Figuur 28: Werkingsprincipe van een incrementele encoder op basis van optische sensoren. Overgenomen van Jean Pollefliet (<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/incremental-encoder>). © Jean Pollefliet.

Vergelijkingstabel toerental meettechnieken

Tabel C.3: Vergelijkingstabel van meettechnieken omtrent toerental, relatief ten opzichte van elkaar. '+' geeft positieve eigenschappen aan, en '-' negatieve.

	Precisie	Complexiteit inbouw	Situatie	Onderhouds- gevoeligheid	Reproduceer- baarheid	Opmerkingen
Digitale hand tachometer	–	N.b.	Nabijheid/ Optisch	N.b.	N.b.	Handinstrument om controles uit te voeren.
Infrarood	+	+	Optisch	+	+	Wanneer een laser gebruikt wordt kan vuil op reflectiemateriaal de meting beïnvloeden.
Stroboscoop	+	N.b.	Optisch	N.b.	++	Methode om een vast toerental te meten. Meestal beschikbaar als handinstrument.
Inductief	+	–	Nabijheid	N.b.	++	Precisie afhankelijk van opstelling.
Capacitief	+	–	Nabijheid	N.b.	++	Toepassing bedoeld wanneer gebruik van metaal niet mogelijk is. Precisie afhankelijk van opstelling.
Magnetisch	+	–	Nabijheid	N.b.	++	Voor extreme omgevingsfactoren. Kan beïnvloed worden door magneten in de omgeving. Precisie afhankelijk van opstelling.
Incrementele encoder	++	++	Nabijheid/ Optisch	N.b.	++	

Overige opmerkingen:

- Vergelijkingen zijn relatief ten opzichte van elkaar en zijn geschat aan de hand van beschikbare informatie en eigen kennis, en dient als hulpmiddel bij het kiezen van een meettechniek.
- Geen informatie bekend over onderhoudsgevoeligheid. Vrijwel alle meettechnieken zijn contactloos, dus zal enig onderhoud hoogstens het vervangen van sensoren bedragen.

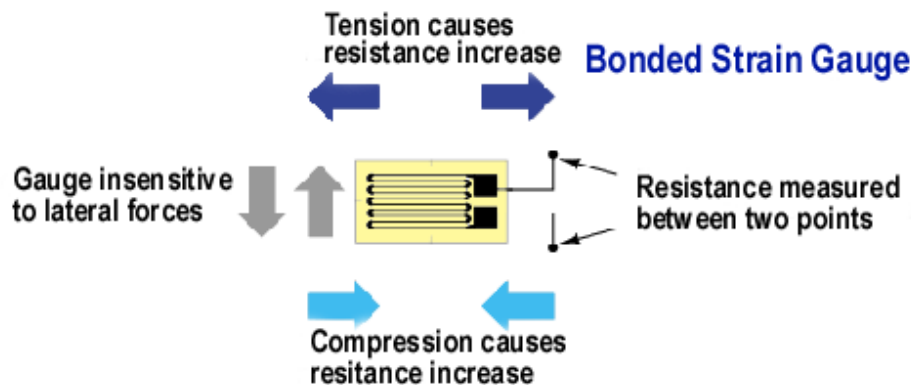
C.4 Koppel

Tijdens het testen van motoren zal er een koppel op de as ontstaan welke geabsorbeerd en gemeten moet worden. Dit geldt voor zowel dynamische als statische koppel. Voor het meten van koppel zijn een beperkt aantal meetprincipes beschikbaar.

Rekstrookjes

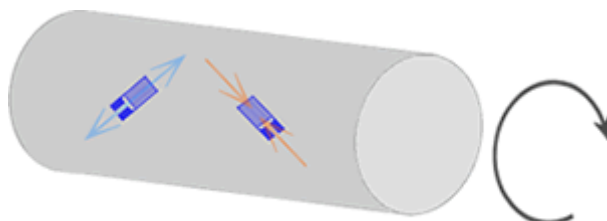
Wanneer een object wordt belast ontstaat er een interne spanning in het materiaal van het object. Spanning is afhankelijk van de aanwezige kracht en het oppervlak, en leidt tot een bepaalde hoeveelheid elastische vervorming, er van uit gaande dat er niet genoeg kracht wordt uitgeoefend om plastische vervorming te veroorzaken. Deze vervorming is in de meeste gevallen zeer klein en niet met het blote oog zichtbaar. Echter wordt de elastische vervorming van een belast object regelmatig gebruikt om aanwezige krachten te kunnen meten door middel van rekstrookjes.

Rekstrookjes zijn stickers met hierin een gekronkeld element dat stroom geleidt, wat in dit geval de sensor is, en worden aangesloten in een brug van Wheatstone. Wanneer dit element uitgerekt wordt in een bepaalde richting veranderd de weerstand van het circuit omdat het langer aldus dunner wordt, zie figuur 29. Door de veranderende weerstanden in de strookjes kan een voltageverschil gemeten worden wat evenredig is met de rek van het materiaal.



Figuur 29: Werkingsprincipe van een rekstrookje. Overgenomen van Mechanical Engineering Department (http://web.deu.edu.tr/mechatronics/old/TUR/strain_gauge.htm). © Mechanical Engineering Department.

In het geval van torsie meten in een as zal er onderscheid gemaakt moeten worden tussen rek- en drukspanning. In figuur 30 is een voorbeeld weergegeven van een dergelijke opstelling. Dankzij een combinatie van de meetgegevens kan eenvoudig het aanwezige koppel berekend worden.



Strain Gauges Bonded to a Torque Shaft

Figuur 30: Onder een hoek van 45° richting beide kanten vanaf de axiale lijn kan zowel rek- en drukspanning gemeten worden. Overgenomen van Learn CNC (<https://learn-cnc.com/torque-sensor/>). © Learn CNC.

Rekstrookjes worden in het algemeen veel toegepast en zijn de basis van koppelmeetsystemen. In deze systemen wordt nog een groot onderscheid gemaakt in gewenste uitvoering, de beoogde applicatie, dynamische aspecten, locatie in het systeem en omgevingskenmerken.

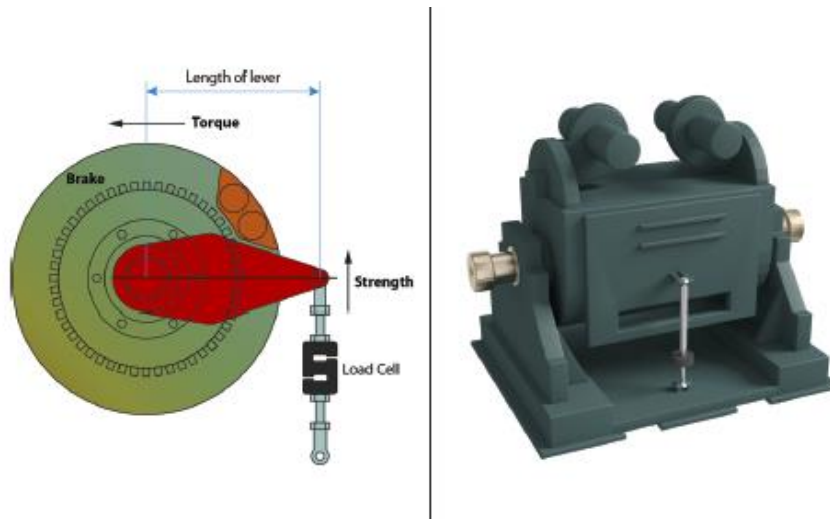
Reactie koppel sensor (statisch)

Koppel kan zowel statisch als dynamisch gemeten worden. Bij een statische meetopstelling vindt er bijna geen tot geen rotatie plaats (rotatie $< 360^\circ$) en wordt de reactiekoppel gemeten. Over het algemeen is dit een eenvoudige en betaalbare methode om koppel meten.

Krachtsensor

Er zijn zowel druk- als trek krachtsensoren welke beiden de aangebrachte kracht kunnen meten. Deze sensoren werken met behulp van rekstrookjes en zijn beschikbaar in vele uitvoeringen. Wanneer een arm wordt gemonteerd aan hetgeen wat de kracht absorbeert en dit niet aan de vaste wereld is gemonteerd kan hier een krachtsensor aan worden gekoppeld zodat beweging wordt tegengehouden.

Zodra een motor wordt getest en deze een koppel uitoefent op de opstelling zal de krachtopnemer willen meedraaien. De krachtsensor zal deze rotatie tegenhouden waardoor de aanwezige koppel berekend kan worden aan de hand van de gemeten kracht en de lengte van de arm. Een voorbeeld van een dergelijke statische opstelling wordt weergegeven in figuur 31.



Figuur 31: Voorbeeld van een opstelling waarbij koppel wordt gemeten met een krachtsensor. Overgenomen van Tech Briefs (<https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/features/application-briefs/24433>). © Tech Briefs Media Group.

Reactie koppel sensor

Als statische opstelling is het ook mogelijk om voor een compacte flensuitvoering te kiezen. Deze kan bijvoorbeeld gemonteerd worden tussen het aangedreven object en een vast montagepunt. Het werkingsprincipe komt neer op het toepassen van een krachtsensor, behalve dat de rekstrookjes op een cilindrisch vlak zijn aangebracht en deze de torsie direct meten. Bovendien zijn dit onderhoudsvrije sensoren aangezien er geen bewegende onderdelen aanwezig zijn.

Roterende koppel sensor (dynamisch)

Voor dynamische meetopstellingen waarbij het koppel direct van een constant of periodiek roterende as (rotatie $> 360^\circ$) gemeten moet worden kan een roterende koppel sensor toegepast worden. Deze systemen zijn wat complexer dan reactie koppel sensoren aangezien een signaal afgegeven moet worden van- en naar een roterend object.

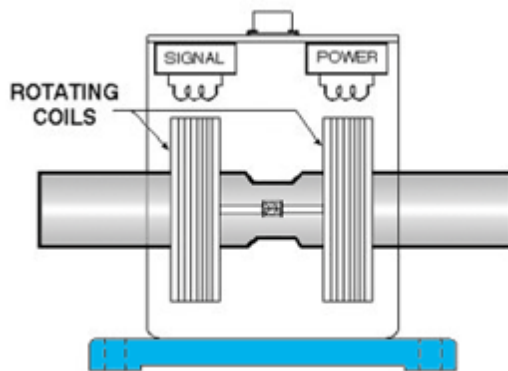
Sleepring koppel sensor

De meest bekende vorm van een roterende koppel sensor is een variant die werkt met behulp van sleepringen. Vaak betreft het een behuizing met een uitstekende of holle as die gekoppeld kan worden tussen de aandrijving en de krachtopnemer. Binnen in de behuizing zijn er rekstrookjes geplaatst op deze as en kunnen het signaal ontvangen en doorsturen via sleepringen en borstels.

Aangezien er wrijving tussen de sleepringen en borstels ontstaat is de toegestane snelheid en duur van het testen beperkt. De maximale snelheid van een dergelijke sensor wordt bepaald door de snelheid op het contactpunt van borstels en ringen. Om deze reden zal er bij grote koppel sensoren met sleepringen een laag toegestaan toerental aangeraden worden. Bij kleine koppel sensoren zal dit contact een relatief grote weerstand genereren waardoor het niet mogelijk is om zeer lage koppel te meten.

Transformator koppel sensor

Om contact te vermijden zoals in een koppel sensor met sleepringen kan er een transformator gebruikt worden, zie figuur 32. Via deze transformatoren zullen er signalen van- en naar de rekstrookjes gezonden kunnen worden. Verder is het werkingsprincipe gelijk aan de koppel sensor met sleepringen.



Figuur 32: Dynamische koppel sensor met behulp van een transformator. Overgenomen van Bestech (<https://www.bestech.com.au/product/dr-2477/>). © Bestech.

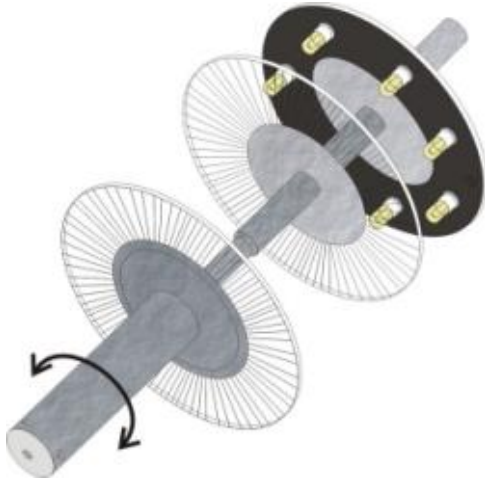
Aangezien er geen contact is met de borstels zal het maximale toerental hoger zijn zolang het binnen het limiet blijft van de transformatoren. Ook zijn de metingen nauwkeuriger aangezien er geen weerstand meer optreedt tussen borstels en ringen.

Telemetrie koppel sensor

In speciale gevallen kan het signaal van de rekstrookjes op een as contactloos overgebracht worden via radiogolven. Op deze manier is het mogelijk om op lange afstand de data te ontvangen en terug om te zetten naar de gemeten waarden. Meestal zijn opstellingen die gebruik maken van een dergelijke techniek eenvoudig van aard en makkelijk te installeren, aangezien er weinig onderdelen in een dergelijke opstelling zitten. Echter moet er wel rekening gehouden worden met een stroombron in- of rond de as waar de rekstrookjes zich bevinden, meestal gerealiseerd met batterijen.

Optische koppel sensor

Een optische sensor werkt met behulp van rekstrookjes, maar op basis van lichtintensiteit. In figuur 33 is een voorbeeld te zien van de wijze hoe het koppel wordt gemeten. Aan de uiteindes van het as gedeelte waarvan het koppel gewenst is om te weten zijn twee schijven met roostersegmenten verbonden, zodanig dat axiaal gezien de ene schijf deels de doorzichtige segmenten van de ander verbergen. Licht schijnt door de beiden schijven en de intensiteit van het licht wordt aan de andere kant gemeten.



Figuur 33: Licht wordt deels geblokkeerd door beide schijven en resulteert in veranderende intensiteit. Overgenomen van Sensor Technology Ltd (<https://www.sensors.co.uk/about-us/technology/#optical-technology>). © Sensor Technology Ltd.

Wanneer koppel op de as plaatsvindt zullen de schijven geen synchrone rotatieverhouding ten opzichte van elkaar hebben dankzij torsie in het te meten as gedeelte. Omdat de blokkeringen in de schijven hierdoor meer of minder overlappen zal er een verandering in lichtintensiteit optreden. Deze verandering wordt gemeten en omgezet tot een signaal wat vertaald kan worden naar de aanwezige koppel.

Met behulp van deze meetmethode kan contactloos en beide richtingen worden gemeten met een hoge nauwkeurigheid en is de opstelling niet onderhoudsgevoelig.

Elektromotor

Met behulp van een elektromotor kan ook een koppel gemeten worden. Wanneer een elektromotor wordt toegepast als krachtopnemer kan deze bewerkstelligd worden als een rem. Zodra mechanische energie ontstaan van een andere krachtbron wordt overgedragen aan een elektromotor zal er inductiestroom ontstaan. Over het algemeen geldt dat het gecreëerde voltage iets zegt over het toerental, en de stroomsterkte over het aanwezige koppel.

In de realiteit is het enigszins complex om de hoeveelheid aanwezige koppel te kunnen concluderen aan de hand van de gemeten inductiestroom. Dit zal berekend moeten worden aan de hand van de gemeten stroom en het toerental. Een belangrijke factor voor deze berekening is dat de efficiëntie van de motor bekend is. Meestal is dit een curve, wat wil zeggen dat ieder toerental een verschillend rendement heeft.

Bovendien moet de motor het aan kunnen om deze functie te kunnen voldoen. Tijdens het remmen van een elektromotor ontstaan hoge voltages en/of stroomsterktes welke omgezet worden in warmte. Dit kan leiden tot doorgebrande kabels of elementen uit het controller circuit.

Vergelijkingstabel koppel meettechnieken

Tabel C.4: Vergelijkingstabel van meettechnieken omtrent luchtdruk, relatief ten opzichte van elkaar. ‘+’ geeft positieve eigenschappen aan, en ‘–’ negatieve.

	Precisie	Complexiteit inbouw	Situatie	Onderhouds- gevoeligheid	Reproduceer- baarheid	Opmerkingen
Rekstrookjes	++	--	Statisch/ Dynamisch	++	++	Complex om zelf correct toe te passen. Hechting van strookjes op meetobject beïnvloed resultaten. Rekstrookjes zijn professioneel geïnstalleerd in koppel sensoren.
Krachtsensor	–	+	Statisch	++	++	Precisie is afhankelijk van de opstelling en beginstand van motor.
Reactie koppel sensor	+	+	Statisch	++	++	Precisie is afhankelijk van de opstelling en beginstand van motor.
Sleeping koppel sensor	+	–	Statisch/ Dynamisch	--	+	Onderhoudsgevoeligheid zeer afhankelijk van toerental. Lage koppel kan beïnvloed worden door weerstand.
Transformator koppel sensor	++	–	Statisch/ Dynamisch	+	+	
Telemetrie koppel sensor	++	+	Statisch/ Dynamisch	–	+	Batterijen moeten regelmatig vervangen worden bij veel gebruik.
Optische koppel sensor	++	–	Statisch/ Dynamisch	+	+	
Elektromotor	--	++	Statisch/ Dynamisch	+	+	Achterhalen van aanwezige koppel kan complex zijn wanneer het dynamische rendement onbekend is.

Overige opmerkingen:

- Vergelijkingen zijn relatief ten opzichte van elkaar en zijn geschat aan de hand van beschikbare informatie en eigen kennis, en dient als hulpmiddel bij het kiezen van een meettechniek.

Bijlage D: Onderzoek krachtopnemers

Wanneer de testmotoren aangesloten worden aan een persdrukleiding en er druk op gezet wordt zullen deze hoog in de toeren lopen terwijl er geen koppel aanwezig is in de uitgaande as. Om een koppel te genereren is het van belang dat er een belasting gesimuleerd wordt zodat deze gemeten kan worden. Hiervoor is het belangrijkste aspect dat de rotatie van de uitgaande as tegengehouden wordt. De mate waarin deze belasting aanwezig is moet instelbaar zijn.

D.1 Motoren

Een mogelijke optie voor het creëren van een instelbare belasting is het koppelen van een andere motor op de testmotor. Deze motor moet dan met een lager koppel aangedreven worden dan de testmotor kan genereren, en in tegengestelde richting. Voor elektromotoren geldt dan dat er een functie aanwezig moet zijn om als generator een gewenste hoeveelheid te remmen en de ontstane elektrische energie af te voeren.

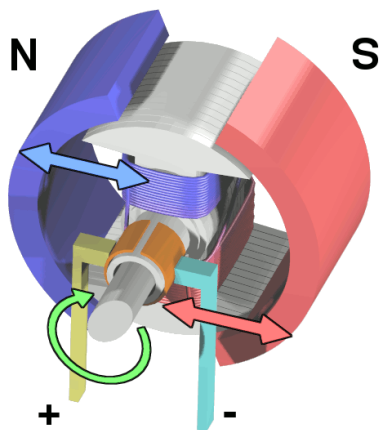
De meest eenvoudige motoren voor deze toepassing zijn elektromotoren en luchtmotoren.

Elektromotor

Een elektromotor werkt op basis van elektriciteit wat geregeld wordt door een motorcontroller. Dankzij dit werkingsprincipe zijn elektromotoren eenvoudig te programmeren aldus te besturen en kunnen ze een hoog koppel genereren binnen een hoog toerental bereik. Er zijn een aantal soorten elektromotoren waarvan het werkingsprincipe met enkele voor- en nadelen kort worden toegelicht.

DC elektromotor

DC elektromotor zijn de meest bekende motoren en werken op basis van een permanente magneet in de behuizing (stator) met een as (rotor) waar omheen koperdraad is gewikkeld om een magnetisch veld te kunnen genereren, zie figuur 34. Gelijkstroom wat benodigd is in de wikkelingen wordt overgedragen via borstels welke contact maken met een collector aan de rotor. De collector zorgt in dit geval ook dat de elektrische stroom die het magnetische veld creëert op het juiste moment omdraait zodat de rotor door kan draaien.



Figuur 34: Werkingsprincipe van een DC elektromotor. Het rode en blauwe gedeelte zijn de polen van de magneten, oranje geeft de collector aan en lichtblauw en geel stellen de borstels voor. Overgenomen van Wikipedia (<https://nl.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>). © Abnormaal.

Dit type motor kan eventueel direct op een stroombron worden aangesloten, maar kan met behulp van een voltagereregelaar de gewenste snelheid behalen. Over het algemeen hebben DC motoren vooral een hoog koppel vanaf stilstand tot een redelijk toerental. Verder is de efficiëntie van een DC elektromotor hoog aangezien er gebruik wordt gemaakt van permanente magneten. Echter treedt er slijtage op aan de borstels en moeten deze periodiek worden vervangen.

BLDC elektromotor

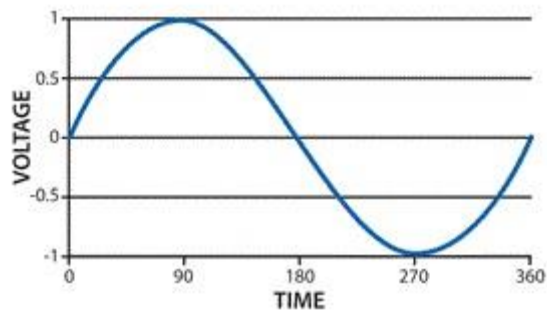
Een borstelloze DC elektromotor (BLDC) werkt ongeveer hetzelfde, behalve dat de permanente magneet zich vaak bevindt op de rotor. Zo hoeft er dus geen stroom naar de rotor worden overgedragen maar naar de wikkelingen in de stator. Omdat er ook geen collector is die de polariteit van de elektromagneet omdraait moet de stroom elektronisch omgedraaid worden op het juiste moment. Door middel van een nabijheidssensor kan de positie van de rotor bepaald worden en weet de controller wanneer de polariteit omgedraaid moet worden.

Omdat er geen gebruik gemaakt wordt van borstels is het rendement van dit type motor nog hoger dan bij een DC motor. Er treedt nauwelijks slijtage op omdat er geen contact wordt gemaakt. Het koppel kan hoger zijn dan van een DC motor omdat er dus geen wrijving plaatsvindt en er dankzij het weglaten van de borstels meer ruimte is voor grotere componenten om koppel te genereren.

AC asynchrone elektromotor

Een AC asynchrone elektromotor werkt op basis van wisselstroom en wordt opgedeeld in een 1- (, 2-) en 3 fase motor. In het algemeen bevindt zich in de stator een ordening van spoelen, welke dus elektromagneten voorstellen, die een roterend elektromagnetisch veld creëren door middel van een controller. De rotor in de motor is een elektrische geleider en genereert door middel van inductie een bepaalde hoeveelheid stroom. Wanneer er bijvoorbeeld wikkelingen van geleidend materiaal om de rotor zitten zal dit dus ook een elektromagneet vormen welke het roterende magnetische veld van de stator wilt volgen. Om de motor van snelheid te laten veranderen wordt de frequentie van de wisselingen in de wisselstroom veranderd. Dit gebeurt in de motorcontroller en is dus altijd benodigd om een AC elektromotor aan te drijven. De rotor zal altijd net langzamer draaien dan het roterende veld van de stator. Hoe hoger de belasting van de motor, des te groter is het snelheidsverschil tussen de rotor en het roterende veld. Dit snelheidsverschil wordt slip genoemd. Wanneer de slip te groot wordt, door bijvoorbeeld een te grote belasting, kan de rotor het roterende veld niet meer bijhouden en zal hij stilstaan.

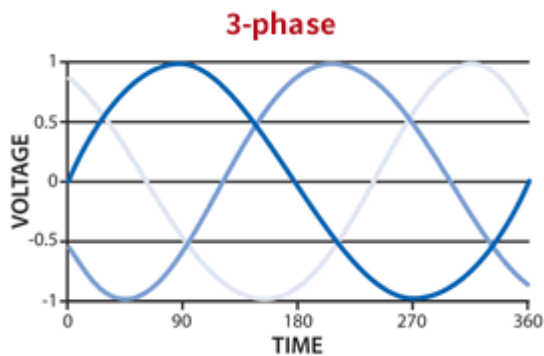
In een 1-fase elektromotor bevindt zich in de stator één noord- en zuidpool van een elektromagneet. De rotor, welke ook een elektromagneet is, zal zijn noord pool naar de zuidpool van de stator willen draaien. Zodra die daar aangekomen is draaien de polen van de elektromagneet in de stator om en draait de rotor weer 180 graden verder. Op het moment dat de noord- en zuidpool van de rotor 90 graden gedraaid staan ten opzichte van de noord- en zuidpool van de stator heeft de rotor een maximaal koppel dankzij het hefboomprincipe. In figuur 35 wordt weergegeven hoe het voltage wisselt ten opzichte van de rotorpositie.



Figuur 35: 1-fase wisselstroom ten opzichte van de tijd, in dit geval de rotorpositie. Overgenomen van Tripplite (<https://blog.tripplite.com/single-phase-vs-three-phase-power-explained>). © Tripplite.

Eigenschappen van een 1-fase elektromotor zijn dat deze vaak relatief klein zijn en een gelimiteerd koppel kunnen genereren. Het roterend magnetische veld is heel pulserend, wat ook leidt tot het genereren van een koppel die wat schokkend overgebracht wordt.

Een 3-fase elektromotor maakt gebruik van drie fasestroom met drie groepen windingen. Wanneer deze groepen 120 graden tegenover elkaar staan en de drie wisselstromen dezelfde frequentie hebben zal een dergelijke grafiek er uit zien zoals weergegeven in figuur 36. In dit geval zal dus de noordpool van de rotor 120 graden draaien richting de zuidpool van de stator, welke daarna omdraait en de volgende groep 120 graden verder een zuidpool zal zijn, etc. Door dit werkingsprincipe wordt een hoger vermogen behaald dan in een 1-fase elektromotor en is de koppeloverbrenging een stuk gelijkmatiger. Elektromotoren die werken op basis van 3-fasen zijn ook verkrijgbaar tot veel hogere vermogens en grotere bouwmaten dan 1-fase motoren.



Figuur 36: 3-fase wisselstroom ten opzichte van de tijd, in dit geval de rotorpositie. Overgenomen van Tripplite (<https://blog.tripplite.com/single-phase-vs-three-phase-power-explained>). © Tripplite.

AC synchrone elektromotor

Het verschil met een asynchrone en een synchrone elektromotor is dat in een synchrone motor de rotor gelijk roteert met het roterend magnetische veld. Dit type motor werkt met behulp van 3-fase wisselstroom naar de stator en gelijkstroom naar de rotor. De stator genereert een roterend magnetisch veld en de rotor creëert een stationair magnetisch veld. Het magnetische veld van de rotor wil als het ware gekoppeld worden aan het roterende veld.

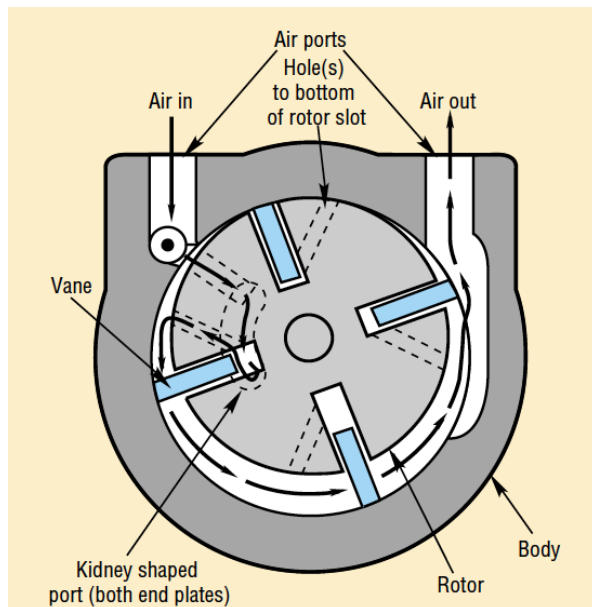
Dit type motor kan niet zomaar vanuit stilstand starten en moet dus op een andere manier op gang komen. Zodra deze op gang is gekomen zal de rotor gelijk proberen te lopen met het roterende veld tot deze synchroon roteren. De snelheid is vast en afhankelijk van de frequenties van de

wisselstromen. Wanneer de belasting hoger is dan de motor maximaal aan kan zal de rotor zijn synchronisatie verliezen en stil staan.

Luchtmotor

Een luchtmotor werkt op basis van perslucht wat een as aandrijft. Zodra de lucht binnen in het huis komt zal het expanderen waardoor de meedragen energie dankzij verschillende methodes overgedragen kan worden aan de rotor. Het concept is eenvoudig en deze motoren komen in veel verschillende soorten. In figuur 37 wordt een voorbeeld van een vaanmotor weergegeven welke bestaat uit een rotorhuis waarin zich twee aansluitpunten bevinden, de rotor, die excentrisch in de behuizing is geplaatst, en de vanen welke contact maken met de wand van het rotorhuis.

Zodra de lucht binnen komt kan het expanderen en duwt het tegen de eerste vaan waardoor de rotor zal draaien. Net voordat de ruimte tussen de vanen onderin weer nauwer zal worden en de lucht zou gaan comprimeren kan het ontsnappen via een uitsparing onder de uitlaatport. Vaan luchtmotoren die beide kanten kunnen draaien bevatten bij zowel de in- en uitlaatkant een uitsparing.



Figuur 37: Aanzicht van de doorsnede van een vaan luchtmotor. Overgenomen van *Hydraulics&Pneumatics* (<https://www.hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/FluidPowerAcces/Article/False/6422/TechZone-FluidPowerAcces>) © *Hydraulics&Pneumatics*.

Belasting heeft een grote invloed op de snelheid van de motor. De snelheid van luchtmotoren kan geregeld worden met behulp van een drukregelaar die de inlaatstroom kan afknijpen, mits de compressor zorgt voor genoeg lucht. Grotere motoren hebben een grote compressor nodig aangezien de benodigde volumestroom zal toenemen.

Luchtmotoren kunnen een relatief hoog koppel genereren bij hoge toerentallen voor de desbetreffende bouwmaten. Het is van belang dat er een beveiliging aanwezig is tegen overtoeren, aangezien een luchtmotor flink in de toeren zal stijgen wanneer de belasting wegvalt wat kan leiden tot overvullige slijtage.

Wanneer een luchtmotor een tegenkoppel moet leveren zal deze lucht aanzuigen van uit de uitlaatpoort en dit comprimeren. De drukverhoging die ontstaat wordt via de ingaande poort terug geleverd aan de compressor. Dankzij het comprimeren van lucht door de tegenwerkende druk zal de temperatuur binnen de motor flink stijgen.

D.2 Hydraulische pomp

In een hydraulisch systeem worden vaak pompen toegepast om een vloeistof (meestal olie) onder druk te zetten of te transporteren. Deze worden dan vaak weer aangedreven door elektro- of verbrandingsmotoren, maar ook luchtmotoren. Hydraulische pompen zijn weer beschikbaar in vele soorten en maten, respectievelijk afhankelijk van het toepassingsgebied en -bereik.

Ze kunnen dienen als instelbare belasting wanneer de pomp wordt geplaatst in een gesloten circuit met bijvoorbeeld olie. In het circuit moet zich een klep bevinden die de doorstroming kan vernauwen. De hoeveelheid olie die doorgelaten wordt bepaald hoeveel weerstand de pomp ondervindt en dus hoe groot de belasting is voor de aangesloten motor.

Voordelen van hydraulische pompen zijn dat ze zorgen voor een evenredige belasting en dat ze te regelen zijn met een klep. De stromende olie heeft tegelijkertijd een smerend en koelend effect waardoor er weinig slijtage optreedt.

D.3 Remmen

Remsystemen zijn ook geschikt om als krachtopnemer te dienen, aangezien deze zijn ontworpen om een beweging te vertragen of tot stilstand te krijgen. Uiteraard zijn er veel verschillende remsystemen om deze functie te vervullen.

Mechanische rem

Een mechanische rem is het meest bekende en eenvoudige remsysteem en wordt overal voor gebruikt. Er zijn veel type mechanische remmen en worden niet allemaal verklaard. Het principe komt allemaal op hetzelfde neer, namelijk dat frictie plaatsvindt met een onderdeel van het te remmen systeem en daardoor dit af zal vertragen. De mate waarin frictie plaatsvindt is meestal instelbaar en beïnvloedt de remsnelheid. Wanneer geremd wordt zal dankzij de frictie kinetische energie in warmte worden omgezet.

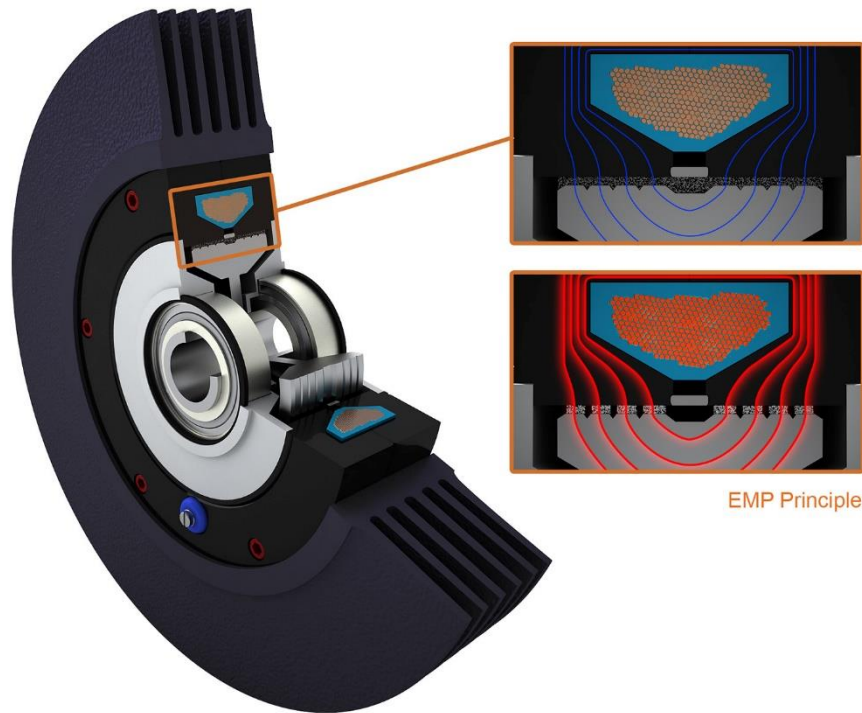
Het nadeel van dit systeem is dat het frictie element snel slijt. Aangezien het doelbewust slijt is dit onderdeel vaak zeer toegankelijk om met gemak te kunnen vervangen.

Elektromagnetische rem

Remsystemen kunnen ook werken dankzij elektromagneten. Deze zijn makkelijk te regelen met een spanningsregelaar en hebben over het algemeen een soepel koppeloverdracht. Een paar bekende remsystemen op basis van elektromagnetisme worden behandeld.

Poederrem

Elektromagnetische poeder remmen (EMP) bestaan uit een behuizing met daar in een uitstekende- of holle as waar een schijf aan verbonden is, zie figuur 38. Tussen de schijf en de behuizing bevindt zich zeer fijne en droge magnetische poeder. Rond de rotor in de behuizing bevindt zich een spoel van geleidend materiaal waarmee een magnetisch veld gecreëerd kan worden. Als er geremd moet worden zal een stroom in deze spoel lopen waardoor het poeder zich gaat herordenen en groeperen rond de magneetveldlijnen. Als het voltage toeneemt zal de bindingskracht sterker worden en ondergaat de rotor een sterkere weerstand. In feite kan dit type hierom ook toegerekend worden tot een mechanische rem. Poederremmen kunnen zeer hoge tegenkoppels genereren, zowel bij stilstand als dynamisch, over gemiddelde tot hoge toerentallen.

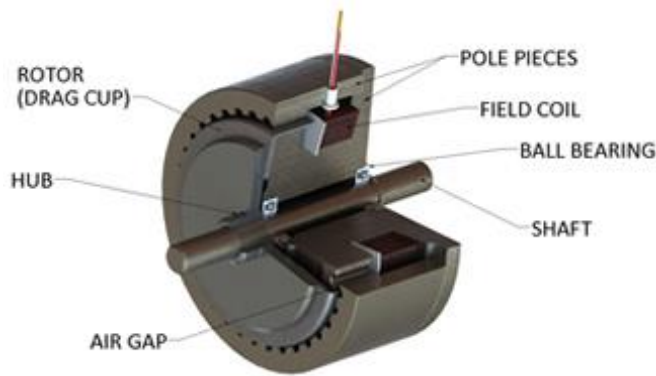


Figuur 38: Visualisatie van een elektromagnetische poederrem. Ook is gevisualiseerd hoe het poeder groepeerd rond de veldlijnen en wordt gedrukt tegen de rotor. Bewerkt overgenomen van KOHMATIC-KOREA (<https://www.youtube.com/watch?v=bgzA4RpF13g>) © KOHMATIC-KOREA.

Het koppel van een EMP rem kan erg nauwkeurig en snel worden geregeld en is evenredig met het voltage wat wordt toegepast. Bovendien kan dit type rem langdurig remmen zonder beschadigd te raken, mits de rem genoeg gekoeld kan worden, en wordt hierom ook veelal toegepast als koppeling.

Hysteresis rem

Een rem gebaseerd op het hysteresis effect werkt aan de hand van een elektromagneet zonder contact tussen de as en de behuizing. In figuur 39 is te zien dat deze behuizing speciaal gevormd is met een spoel hierin verwerkt. Aan de as zit een zogeheten hysteresis schijf gekoppeld. Tussen deze schijf en de behuizing zit een gleuf welke gemagnetiseerd kan worden zodra er stroom wordt toegepast op de spoel. Dankzij het ontstane magnetische veld ondervindt de schijf een weerstand welke vergroot kan worden door het voltage te verhogen tot de as volledig blokkeert. Omdat een wrijvingsloze rotatie optreedt is onderhoud nauwelijks nodig en kan een dergelijke rem zeer precies een koppel overbrengen. Echter is het toepassingsgebied voor hysteresis remmen over het algemeen voor situaties bedoeld met lage koppels en hoge toerentallen.



Figuur 39: Interne visualisatie van een hysterese rem met bijbehorende onderdelen. Overgenomen van Magnetic Technologies (<https://www.magnetictech.com/current-controlled-electric-hysteresis-brakes/>). © Magnetic Technologies.

Eddy-current rem

Dit type rem werkt aan de hand van de wervelstromen (eddy-currents). Wervelstromen zijn elektrische stromen die in een geleidend materiaal bewegen en ontstaan zijn aan de hand van inductie. In bijvoorbeeld een kabel zal stroom het geleidende draad volgen, maar in een object zal het aan de hand van dit werkingsprincipe stromen. Stroom in een geleidend object wat is ontstaan aan de hand van inductie beweegt in een richting (wat leidt tot een magnetisch veld) waardoor het in staat is om hetgeen wat het heeft veroorzaakt tegen te houden. Dit gecreëerde magnetische veld zorgt dus voor een remmende kracht op het bewegende object.

Remsystemen die werken op basis van dit werkingsprincipe kunnen allerlei vormen hebben. Een voorbeeld is een schijf gemonteerd aan een as, met de schijf tussen een elektromagneet, zie figuur 40. Zolang de schijf geleidend is en de elektromagneet aan staat zullen wervelstromen in de schijf een tegenkracht (en warmte) genereren die hem laat vertragen.



Figuur 40: Voorbeeld van een in een hogesnelheidstrein toegepaste eddy-current remsysteem. Overgenomen van C. Woodford (<https://www.explainthatstuff.com/eddy-current-brakes.html>). © C. Woodford.

Het voordeel van dit remprincipe is dat er geen wrijving plaatsvindt, dat het regelbaar is en zeer soepel en constant kan remmen. Bovendien kunnen zeer hoge tegenkoppels en toerentallen bereikt worden. De remkracht is wel afhankelijk van de snelheid en zal dus afnemen naarmate de snelheid lager wordt. Dit betekent dat het niet in staat is om in stilstand een tegenkracht te genereren.

Vergelijkingstabel krachtopnemers

Tabel D.1: Vergelijkingstabel van krachtopnemers, relatief ten opzichte van elkaar. '+' geeft positieve eigenschappen aan, en '-' negatieve.

	Precisie	Complexiteit inbouw	Koppel bij stilstand	Onderhouds- gevoeligheid	Reproduceer- baarheid	Opmerkingen
Elektromotor	++	–	Ja	+	++	Motor moet uitgerust zijn met overige hardware voor remmende functie.
Luchtmotor	–	+	Ja	–	--	Moeilijk om nauwkeurig te sturen. Comprimeren van lucht leidt tot veel warmteontwikkeling.
Hydraulische pomp	+	--	Nee	+	–	Moet aangesloten worden op een gesloten hydraulisch circuit.
Mechanische rem	+	+	Ja	--	+	Minder gunstig voor lang aanhouden van remkracht door geproduceerde warmte. Periodiek vervangen van slijtage onderdelen.
Poederrem	++	+	Ja	+	++	Beschikbaar tot zeer hoge koppels en hoge toerentallen.
Hysteresem rem	++	+	Ja	++	++	Over het algemeen bedoeld voor lage koppels en hoge toerentallen.
Eddy-current rem	+	–	Nee	++	++	Remeigenschappen nemen af naarmate de snelheid afneemt. Beschikbaar tot zeer hoge koppels en toerentallen.

Overige opmerkingen:

- Vergelijkingen zijn relatief ten opzichte van elkaar en zijn geschat aan de hand van beschikbare informatie en eigen kennis, en dient als hulpmiddel bij het kiezen van een krachtopnemer.

Bijlage E: Onderzoek sensor terminologie

E.1 Sensor terminologie

Dit deelhoofdstuk beschrijft wat bedoeld wordt met de verschillende termen die aangegeven worden op datasheets van verschillende sensoren. De meest belangrijke termen worden beschreven in aparte paragrafen, waarna nog een aantal overige termen kort worden toegelicht.

Het is gebruikelijk dat fabrikanten verschillende methodieken en termen gebruiken voor bepaalde specificaties van sensoren. Hierdoor kunnen sommige termen en waardes dus afwijken in de datasheets van verschillende fabrikanten.

Nauwkeurigheid

De onzekerheid in een meting wordt gedefinieerd als nauwkeurigheid. Dit houdt de gemeten waarde in ten opzichte van een absolute standaard waarde. Deze specificatie is gebaseerd op de samenvoeging van offset- en versterkingsparameters. De offset wordt in dit geval gegeven in eenheden zoals voltage en is onafhankelijk van het bereik, ingangssignaal of de versterking. Een versterkingsfout daarentegen is wel afhankelijk van de grootte van het ingangssignaal en wordt gegeven als een percentage.

Als voorbeeld voor een dergelijke parameter kan gegeven worden dat de offset $\pm 0,2$ mV en de versterking $\pm 0,3\%$ bedraagt ($\pm 0,3\% + 0,2$ mV). Bij een sensor met als invoer 0 V, 5 V of 10 V betekent dit respectievelijk dat;

- Voor 0V ($\pm 0,3\% + 0,2$ mV) een leesbereik geeft van -0,002 V – 0,002 V.
- Voor 5V ($\pm 0,3\% + 0,2$ mV) een leesbereik geeft van 4,983 V – 5,017 V.
- Voor 10V ($\pm 0,3\% + 0,2$ mV) een leesbereik geeft van 9,968 V – 10,032 V.

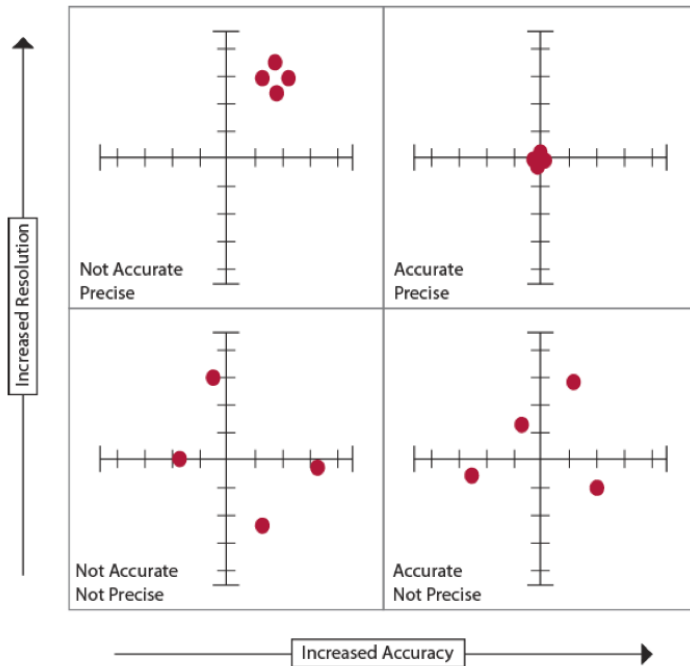
De nauwkeurigheid wordt vaak aangegeven in een bepaalde accuracy class standaard gedefinieerd volgens IEC en ANSI.

Nauwkeurigheid wordt nauwelijks gegeven in de datasheet van een sensor. Als het aangegeven wordt bestaat dit meestal uit de combinatie van een aantal andere specificaties, zoals non-lineariteit, non-reproduceerbaarheid en hysteresis afwijkingen en kan verschillen per fabrikant.

Precisie/reproduceerbaarheid

De precisie van een sensor vertelt iets over de spreiding van de meetwaarden, en moet niet verward worden met de nauwkeurigheid. Precisie heeft invloed op de reproduceerbaarheid van de metingen. Een ideale sensor zal elke meting bij een exact constante situatie dezelfde waarden geven. Wanneer een sensor niet heel precies is zullen de meetwaarden van elkaar afwijken iedere keer dat de meting opnieuw gedaan wordt. In figuur 41 wordt een duidelijk beeld gegeven van het verschil tussen precisie en nauwkeurigheid.

De spreiding wordt, wanneer aangegeven, meestal beschreven in percentages. Om eventueel een kleinere spreiding te creëren kan een gemiddelde genomen worden van meerdere metingen om zo een betrouwbaarder resultaat te behalen.

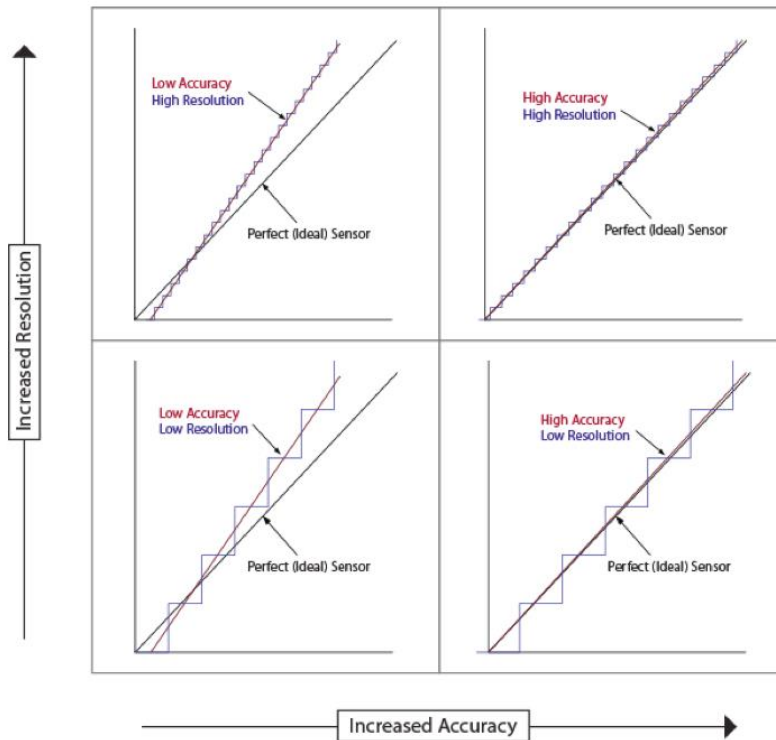


Figuur 41: Verschil tussen de eigenschappen nauwkeurigheid en precisie van sensoren. Overgenomen van All Sensors (<https://allsensors.com/engineering-resources/white-papers/accuracy-and-precision-for-mems-pressure-sensors>). © All Sensors.

Resolutie

De resolutie van een sensor omschrijft de minimale invoer verandering die gedetecteerd en verwerkt tot uitvoer kan worden. In figuur 42 is een grafische weergave van het verschil tussen resolutie en nauwkeurigheid. Om een zo klein mogelijke verandering te meten zullen er zeer kleine voltageverschillen ontstaan welke gehinderd worden door ruis. Dit kan ontstaan door kleine voltageveranderingen in elektronica. Sensoren met een hogere bandbreedte (vaak aangegeven als 'dynamisch') zijn in staat om hogere frequenties te meten, maar hebben meer last van ruis. Signalen die worden gefilterd tot een lagere frequentie (vaak aangegeven als 'statisch') hebben over het algemeen een hogere resolutie, maar zijn beperkt in hoge-snelheidsmetingen doordat deze lagere frequenties kunnen meten.

Gelukkig wordt de resolutie vaak aangegeven in eenheden zoals voltage, percentage ten opzichte van full scale of dimensies, zoals in het geval van een toerentalmeter [PPR] (pulses per revolution). Op deze manier wordt eenvoudig aangeduid wat de kleinste verandering is die de sensor kan meten. Wanneer er voltages aangegeven worden zal dit nog vermenigvuldigd moeten worden met de sensitiviteit.



Figuur 42: Verschil tussen de eigenschappen resolutie en nauwkeurigheid in sensoren. Overgenomen van All Sensors (<https://allsensors.com/engineering-resources/white-papers/accuracy-and-precision-for-mems-pressure-sensors>). © All Sensors.

Sensitiviteit

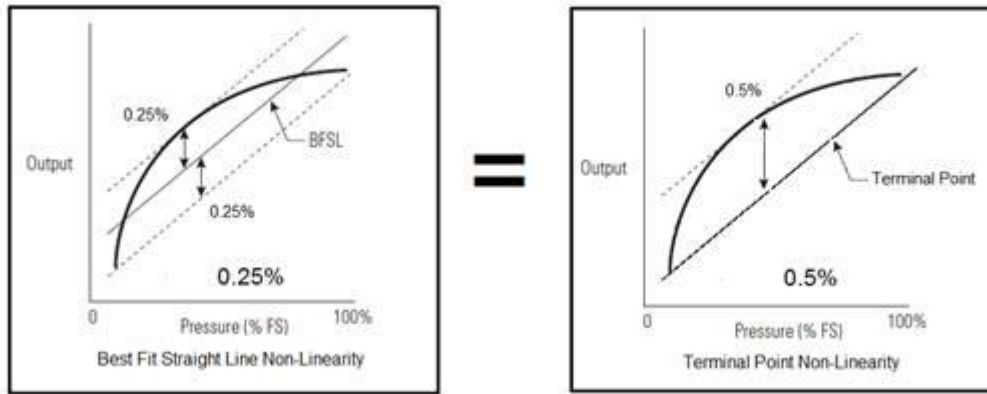
De gevoeligheid, ofwel de sensitiviteit van een sensor, bedraagt de minimale invoer verandering die gedetecteerd en verwerkt tot de gewenste uitvoer kan worden en moet niet verward worden met resolutie. Sensitiviteit wordt uitgedrukt in de beoogde meetbare eenheid ten opzichte van een voltageverschil. Het verschil met resolutie is in dit geval dus dat er niet gekeken wordt naar de kleinste verandering die gedetecteerd kan worden, maar de kleinste verandering die gedetecteerd en omgezet kan worden tot een zo klein mogelijk verandering in de gewenste eenheid. In het geval van koppel meten kan bijvoorbeeld de eenheid van sensitiviteit [mV/V/Nm] bedragen.

Lineariteit

De term lineariteit (of non-lineariteit) beschrijft de afwijking van de meetcurve ten opzichte van de ideale meetcurve. Meestal wordt dit voorgelegd als een percentage van non-lineariteit en is gedefinieerd op basis van het verschil tussen maximale invoer afwijking gedeeld door de gehele full-scale invoer, ofwel [$\pm$ % van FSO].

Er is een onderscheid tussen twee veelvoorkomende methodes voor het meten van non-lineariteit (zie figuur 3 ter illustratie):

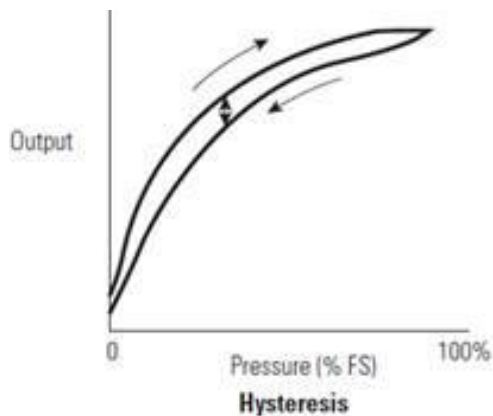
- **Terminal Based Linearity (TBL)/End Point/Straight Line:** output curve die de ideale lijn kruist in beide eindpunten. De gegeven afwijking is de maximale afwijking die kan optreden tussen beide lijnen.
- **Best Fit Straight Line (BFSL):** gekalibreerde output curve waarvan de afwijking ten opzichte van de ideale lijn aan beide uiteinden gelijk zijn aan de waarde waar normaal een maximale afwijking optreedt.



Figuur 43: Verschil tussen non-lineariteit op basis van BFSL en TBL. Overgenomen van Dwyer Instruments (<https://www.dwyer-inst.com/articles/industry/powderbulk/understanding-pressure-sensor-accuracy/understanding-pressure-sensor-accuracy.cfm>). © Dwyer Instruments.

Hysterese

Hysterese afwijkingen hebben te maken met de richting van de veranderende meetwaarde. Wanneer bijvoorbeeld een kracht moet worden gemeten en deze groter wordt tot een bepaald niveau zal de sensor een waarde geven. Wanneer vervolgens de aanwezige kracht afneemt tot hetzelfde niveau als voorheen kan de sensor een afwijkende waarde geven. Dit heeft te maken met het hysteresis effect en wordt aangeduid als een positief of negatief percentageverschil [$\pm$ %]. Een voorbeeld van dit principe wordt weergegeven in figuur 4. Dit effect is bijna in alle gevallen een combinatie van zowel mechanische als temperatuur hysteresis.



Figuur 44: Effect van richtingsverandering op sensor output. Overgenomen uit Dwyer Instruments (<https://www.dwyer-inst.com/articles/industry/powderbulk/understanding-pressure-sensor-accuracy/understanding-pressure-sensor-accuracy.cfm>). © Dwyer Instruments.

Overige

Enkele andere termen, afkortingen en specificaties die regelmatig worden aangegeven bij sensoren zijn:

- **Compensated temperature:** Het temperatuurbereik van de sensor waarin de gegeven nauwkeurigheid geldig is [$^{\circ}\text{C}$].
- **Drift:** Standaard afwijking gecreëerd in een bepaalde tijdsperiode ondanks omgevingsfactoren [$\pm \%$].
- **Full-Scale (Input) (FS):** Het hoogst mogelijke signaal wat in de sensor kan ingevoerd worden terwijl de nauwkeurigheid binnen bepaalde grenzen blijft [V].
- **Full-Scale Output (FSO), Rated Output (RO) of span:** Het verschil in uitvoersignaal wat geproduceerd wordt bij het meten van de maximaal toegestane bedrijfssituatie vergeleken met een minimaal toegestane bedrijfssituatie [mV/V].
- **Operating temperature:** Het temperatuurbereik van de sensor waarin er geen permanente schade wordt aangericht en de sensor bruikbaar blijft [$^{\circ}\text{C}$].
- **Overload capacity of safe overload:** Maximaal toegestane overbelasting van de sensor zonder dat er permanente schade zal optreden [%]. De meetwaarden in dit gebied zullen daarentegen niet meer kloppen volgens de datasheets.
- **Reference temperature:** De temperatuur waar naar wordt gerefereerd bij een afwijkend uitvoersignaal dankzij temperatuurveranderingen.
- **Span offset:** Mogelijke afwijking in uitvoer tussen minimale en maximale aangegeven bedrijfslast en heeft geen invloed op de lineariteit en nauwkeurigheid. De output curve verandert van richtingscoëfficiënt [$\pm \%$ van FS].
- **Temperature effect on span:** Het temperatuur effect on the span betreft de afwijking in uitvoersignaal bij de hoogste nominale bedrijfsbelasting en een bepaald temperatuurverschil in de sensor, mits de temperatuur binnen de aangegeven waardes van de compensated temperature blijft [$\pm \%$ van Load/ $^{\circ}\text{C}$].
- **Temperature effect on zero:** Het temperatuur effect on the zero betreft de afwijking in uitvoersignaal bij de laagste nominale bedrijfsbelasting en een bepaald temperatuurverschil in de sensor, mits de temperatuur binnen de aangegeven waardes van de compensated temperature blijft [$\pm \%$ van FSO/ $^{\circ}\text{C}$].
- **Zero offset of zero balance:** Dit representeert de meetafwijking bij een zo laag mogelijke sensorbelasting en heeft geen invloed op de lineariteit en nauwkeurigheid. De output curve verschuift omhoog of omlaag [$\pm \%$ van FS].

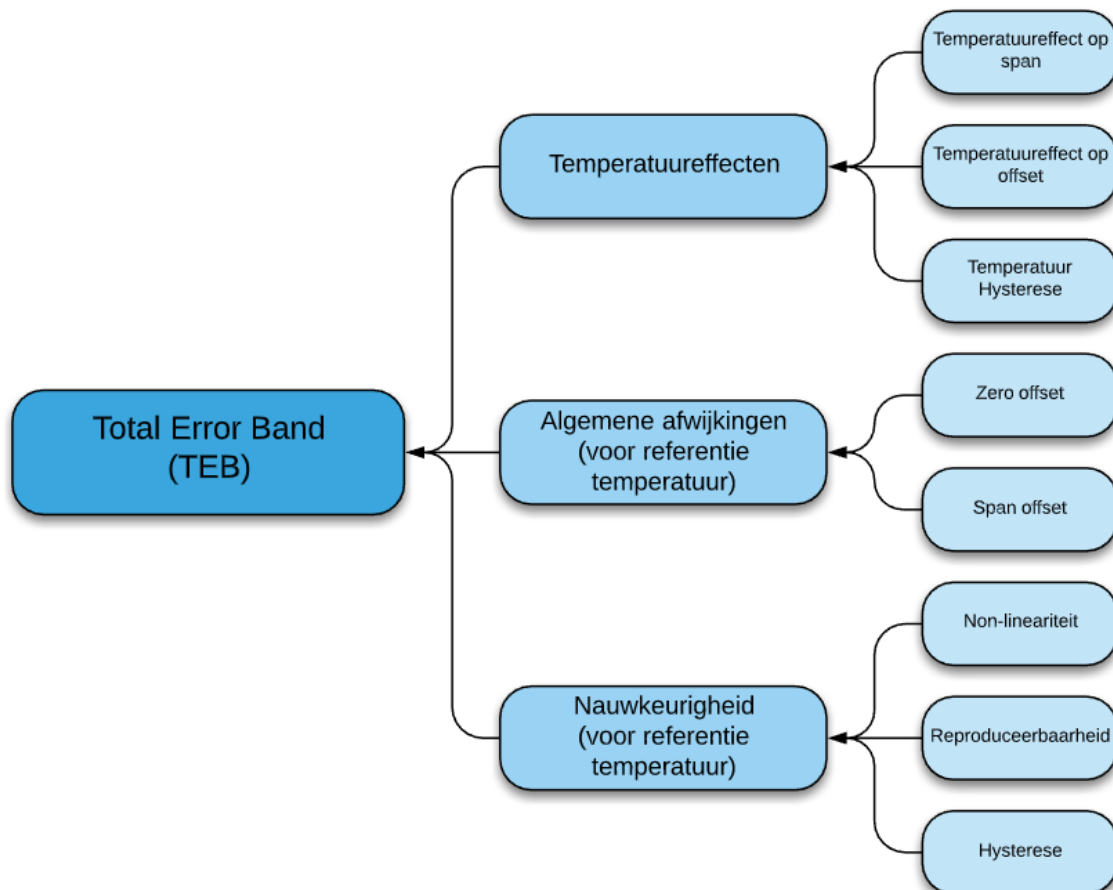
E.2 Meetonzekerheid en Total Error Band (TEB)

Voor het selecteren van een geschikte sensor bij een bepaalde toepassing is het van belang om te weten wat de totale afwijking kan zijn. Wanneer het onduidelijk is wat de mogelijke afwijking van een sensor is kunnen systeemparemeters buiten de opgestelde grenzen treden, mogelijk zonder dat men het verwacht. Om er voor te zorgen dat een systeem binnen de gewenste grenzen functioneert wordt tijdens het ontwerpproces besloten in hoeverre er van de gewenste meting afgeweken mag worden. Aan de hand van de beschikbare data van een sensor kan bepaald worden wat de onzekerheid zal zijn van de meetresultaten in het beoogde toepassingsgebied.

Zoals beschreven in deelhoofdstuk 4.3 kan de data van sensoren, gegeven door de betreffende producenten, afwijken van elkaar als het gaat om inhoud en benaming. Echter blijft de uiteindelijke strategie hetzelfde; de maximale afwijking, vaak de Total Error Band (TEB) of total error genoemd, moet bepaald worden aan de hand van de gegevens van de sensor. De TEB van een sensor zegt iets over de maximale afwijking van de output in de praktijk ten opzichte van de ideale output over een

bepaald bereik. Wanneer deze afwijking zich binnen de toegestane grenswaarden van het systeem bevindt zal een sensor voldoen voor de beoogde toepassing.

De TEB wordt opgemaakt van verschillende gegevens van een sensor. In figuur 45 wordt schematisch getoond welke gegevens dit zijn en hoe deze zijn gecategoriseerd. Het is gebruikelijk dat niet alle gegevens worden gegeven, of dat de TEB zelf al wordt aangegeven voor de uitersten van het temperatuurbereik van een sensor.



Figuur 45: Alle sensorspecificaties welke effect hebben op de maximaal mogelijke meetafwijking van een sensor.

Over het algemeen hebben temperatuur gerelateerde afwijkingen de grootste invloed op de TEB. Voor een toepassing waarbij geen tot kleine temperatuursveranderingen optreden zal de afwijking dankzij temperatuureffecten zeer klein zijn en kan deze verwaarloosd worden. Echter moet wel begrepen worden dat de algemene – en nauwkeurighedsafwijkingen bepaald zijn aan de hand van een referentie temperatuur. Wanneer de temperatuur van het werkgebied van de sensor zich ver buiten deze waarde bevindt zal de sensor gekalibreerd kunnen worden om deze ontstane standaardafwijking te compenseren.

Meetonzekerheid en TEB berekenen

De TEB van een sensor kan berekend worden aan de hand van alle beschikbare data. Deze data omtrent een mogelijke afwijking kan beschouwd worden als een tolerantie. Aan de hand van deze toleranties kan eenvoudig een tolerantieanalyse verricht worden.

Allereerst is het van belang dat duidelijk wordt wat de uiterste afwijking kan zijn van een sensor of systeem. Voor het bepalen van een worst-case error kan de volgende vergelijking toegepast worden:

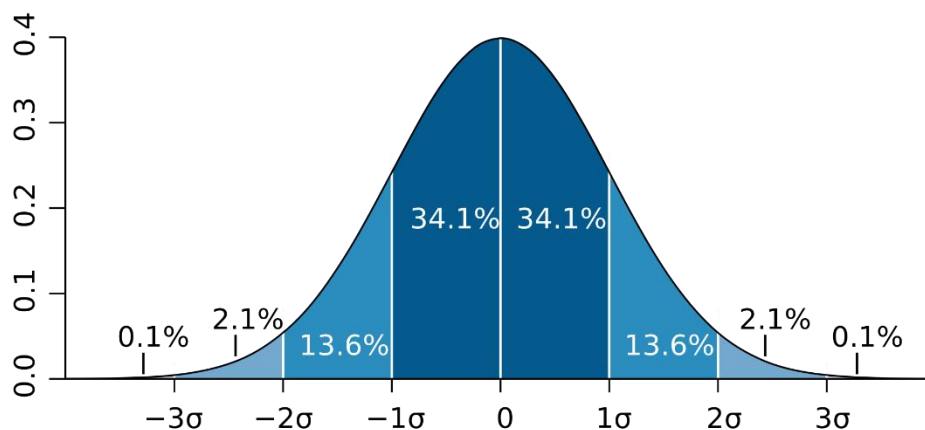
$$e_{wc} = \sum_{i=1}^n e_i = e_1 + e_2 \dots e_{n-1} + e_n = \text{worst case afwijking}$$

Op basis van deze vergelijking zullen alle mogelijk optredende afwijkingen simpelweg bij elkaar opgeteld worden. In dit geval wordt dus berekend hoe groot de afwijking kan zijn wanneer alle optredende afwijkingen maximaal zijn. Aangezien de kans in de praktijk zeer klein is dat een dergelijke situatie optreedt kan het selecteren van een systeem aan de hand van deze informatie onnodig duur worden. Daarom is het gunstig om op een statisch beredeneerde methode te bepalen in hoeverre de meetwaarden daadwerkelijk buiten bepaalde grenzen treden en in welke mate dit is toegestaan. Het is gebruikelijk om deze tolerantiegrenzen te bepalen aan de hand van de normale verdeling.

Volgens statistische beredenering kan de kwadratische optelling van alle mogelijke afwijkingen met behulp van de volgende vergelijking uitgewerkt worden:

$$e_{sg} = \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} = e_1^2 + e_2^2 \dots e_{n-1}^2 + e_n^2 = \text{statistisch gesommeerde afwijking}$$

Het resultaat van de kwadratische optelling betreft de gecombineerde afwijking welke samenvalt met $\pm 3\sigma$ standaardafwijking, zie figuur 46. Dit houdt in dat de gemeten data van een sensor of geheel systeem binnen 99,73% van de gevallen binnen deze statistisch gesommeerde afwijking valt. Dit betekent ook dat 0,27% van de data gemeten is onder een grotere afwijking tot maximaal de worst case afwijking, wat gelijk staat aan ongeveer één op de 370 gegevens.



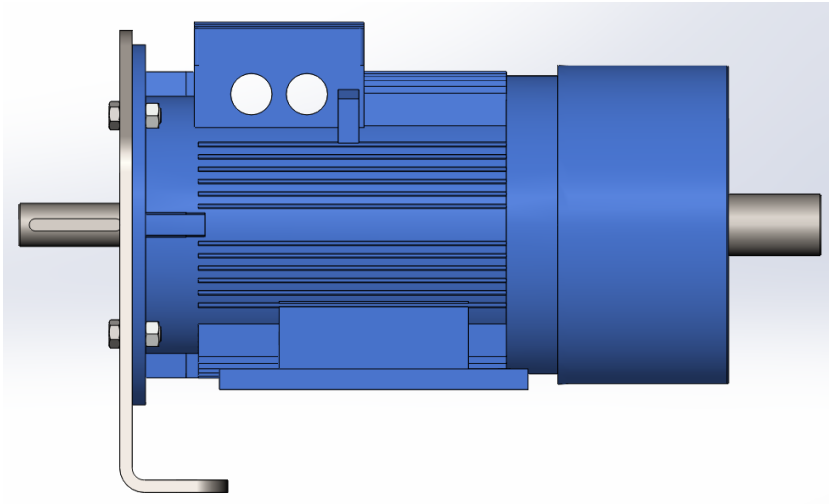
Figuur 46: De spreiding van een normale verdeling van een statistisch benaderd probleem. Binnen het gebied van -3σ en $+3\sigma$ standaardafwijking bevindt zich 99,7% van de waarden of data. Overgenomen van M. W. Toews (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_deviation_diagram.svg#/media/File:Standard_deviation_diagram.svg) © CC BY 2.5

Doorgaans het rapport wordt gesproken over de termen 'TEB' en 'gecombineerde meetafwijking', welke respectievelijk voor sensoren en het gehele systeem toegepast worden.

Bijlage F: Berekeningen

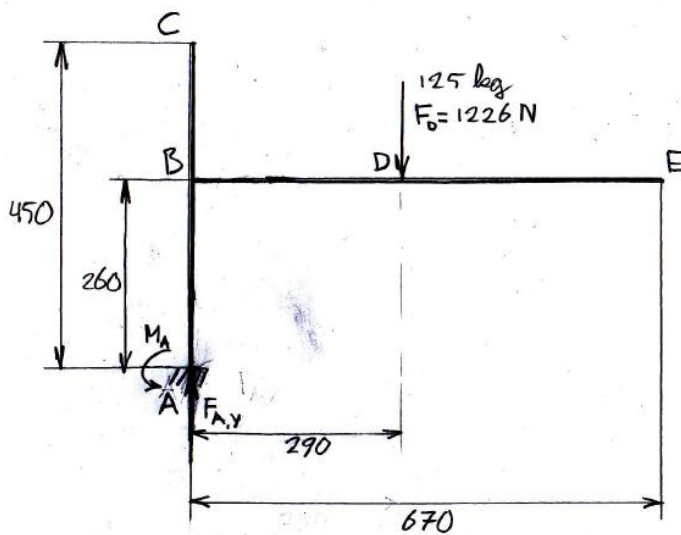
F.1 Enkele ondersteuning elektromotor

Om te bepalen of de elektromotor gedragen kan worden door een enkele rechtopstaande montagebeugel zal bepaald moeten worden of deze de kracht kan dragen en in hoeverre deze zal doorbuigen. Doorbuiging van de beugel zal eveneens invloed hebben op de uitlijning van de koppelingen.



Figuur 47: Weergave elektromotor aan montagebeugel.

Ten eerste moet bepaald worden wat de kracht is die op de beugel wordt uitgeoefend. In figuur 47 wordt de opstelling weergegeven. De lengte vanaf de montagebeugel tot het uiteinde van de achterkant van de motor (inclusief draaggas) betreft 670mm. De motor weegt ongeveer 125kg. Het meeste gewicht van de motor bevindt zich in de voorkant. Echter wordt in de berekening er van uitgegaan dat het zwaartepunt zich in het midden van het frame (580mm) bevindt. Een vrijlichaamsschema van de opstelling wordt weergegeven in figuur 48.



Figuur 48: Vrijlichaamsschema elektromotor aan montagebeugel. Balk AC en BE representeren respectievelijk de beugel en motor.

Met behulp van het vrijlichaamsschema kunnen de reactiekrachten in punt A bepaald worden. Er zijn geen krachten in de x-richting, dus:

$$\sum \uparrow F_y = 0$$

$$F_{A,y} - F_D = 0 \rightarrow F_{A,y} - 1226 = 0$$

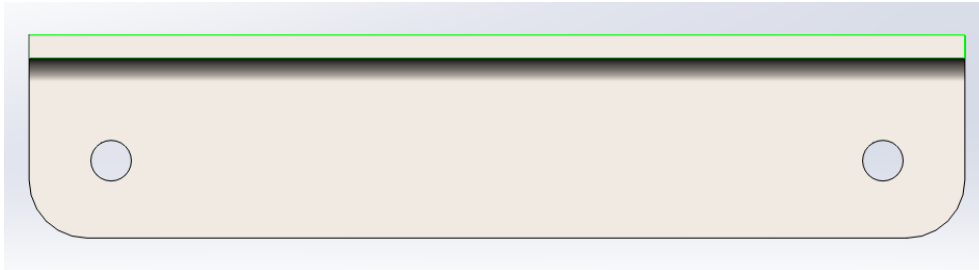
$$F_{A,y} = 1226 \text{ N}$$

$$\sum \curvearrowright M_A = 0$$

$$M_A - F_D \times 0,29 = 0 \rightarrow M_A - 1226 \times 0,29 = 0$$

$$M_A = 355,6 \text{ Nm}$$

Aan de hand van de reactiekrachten kan de beugel berekend worden voor buiging. De oppervlakte wat wordt weergegeven in figuur 49 ondervindt de grootste buigspanning en bevindt zich, aan de hand van het vrijlichaamsschema, net boven punt A. De afmetingen van de oppervlakte zijn 485mm x 12mm.



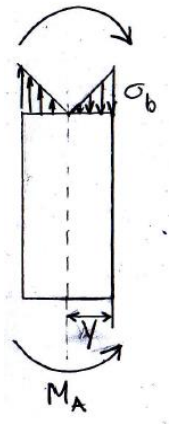
Figuur 49: Het groen omlinjde veld is het oppervlakte van de montagebeugel waar de grootste buigspanning optreedt.

Om de buigspanning in dit oppervlakte te berekenen is het oppervlaktetraagheidsmoment benodigd:

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = \frac{1}{12} \times 485 \times 12^3 = 69840 \text{ mm}^4$$

Vervolgens kan de buigspanning, weergegeven in figuur 50, in dit oppervlakte berekend worden:

$$\sigma_b = \frac{M_A \times y}{I} = \frac{3,56 \times 10^5 \times 6}{69840} = 30,5 \text{ MPa}$$

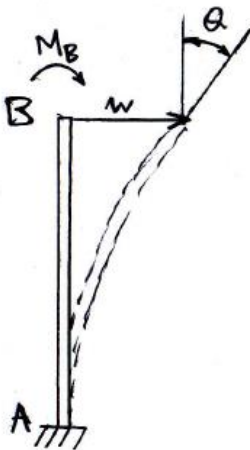


Figuur 50: Zijaanzicht van een element van de beugel aan punt A. De neutrale lijn met de optredende buigspanningen zijn getoond.

Voor het berekenen van de doorbuiging moet het moment bekend zijn in punt B. Aangezien de afstand haaks ten opzichte van de kracht gelijk is als bij punt A is het moment in punt B gelijk, namelijk 355,6 Nm. Het materiaal wat gebruikt wordt betreft standaard constructiestaal S235JR, met als eigenschappen een elasticiteitsmodulus van $E = 210 \text{ GPa}$ en een minimale vloeigrens van 235 MPa. Aan de hand van figuur 51 en de benoemde gegevens kan de maximale doorbuiging worden berekend in de montagebeugel:

$$\theta_{\max} = \frac{M_B \times l}{E \times I} = \frac{355600 \times 260}{210000 \times 69840} = 6,3 \times 10^{-3} \text{ rad} = 0,36^\circ$$

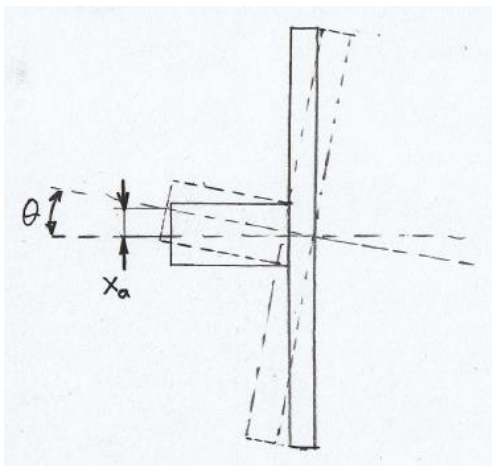
$$w_{\max} = \frac{M_B \times l^2}{2 \times E \times I} = \frac{355600 \times 260^2}{2 \times 210000 \times 69840} = 0,82 \text{ mm}$$



Figuur 51: Schets van de beugel onder belasting met betrekking tot de doorbuiging en hoekverdraaiing. Het gedeelte tussen punten A en B van figuur 48 is weergegeven.

Dankzij de buiging ontstaat er een hoekverdraaiing en translatie van het montagepunt welke effect hebben op de uitlijning van de aandrijving. Aangezien de translatie in de lengterichting optreedt zal alleen de hoekverdraaiing effect hebben op de uitlijning, zie figuur 52. De elektromotor heeft een uitgaande as met een lengte van 110mm vanaf het montagevlak. De radiale afwijking bij het uiteinde van de uitgaande as betreft dan:

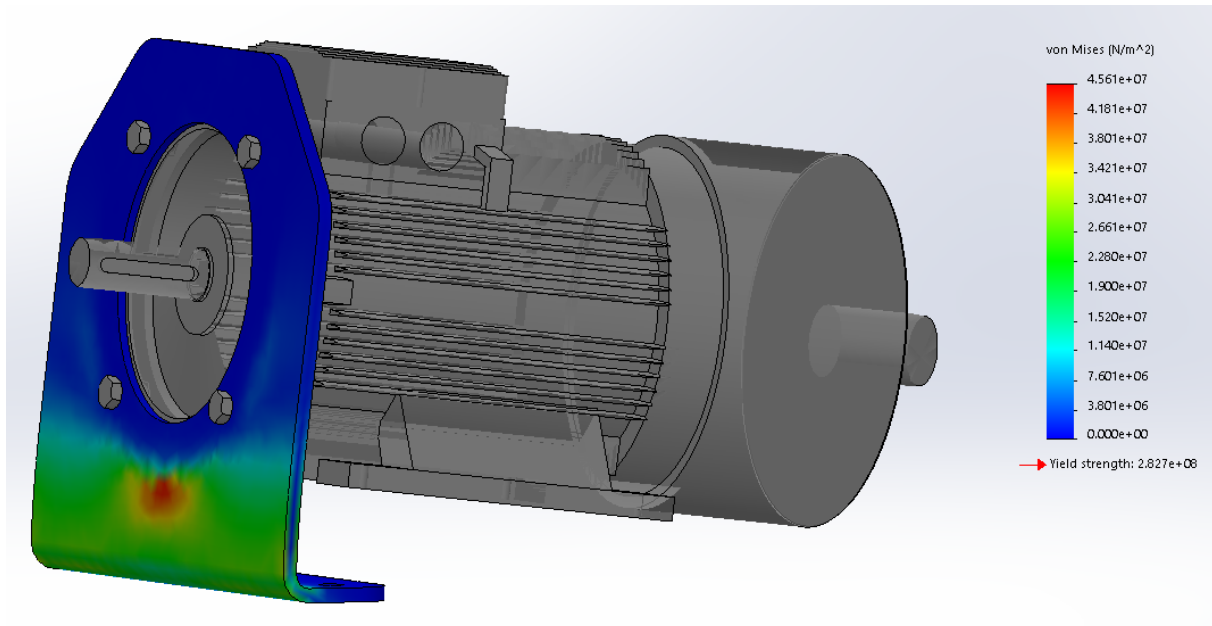
$$x_a = \sin(\theta) \times l = \sin(0,36) \times 110 = 0,69 \text{ mm}$$



Figuur 52: Radiale afwijking van de uitgaande as wat ontstaat door een hoekverdraaiing in de montagebeugel.

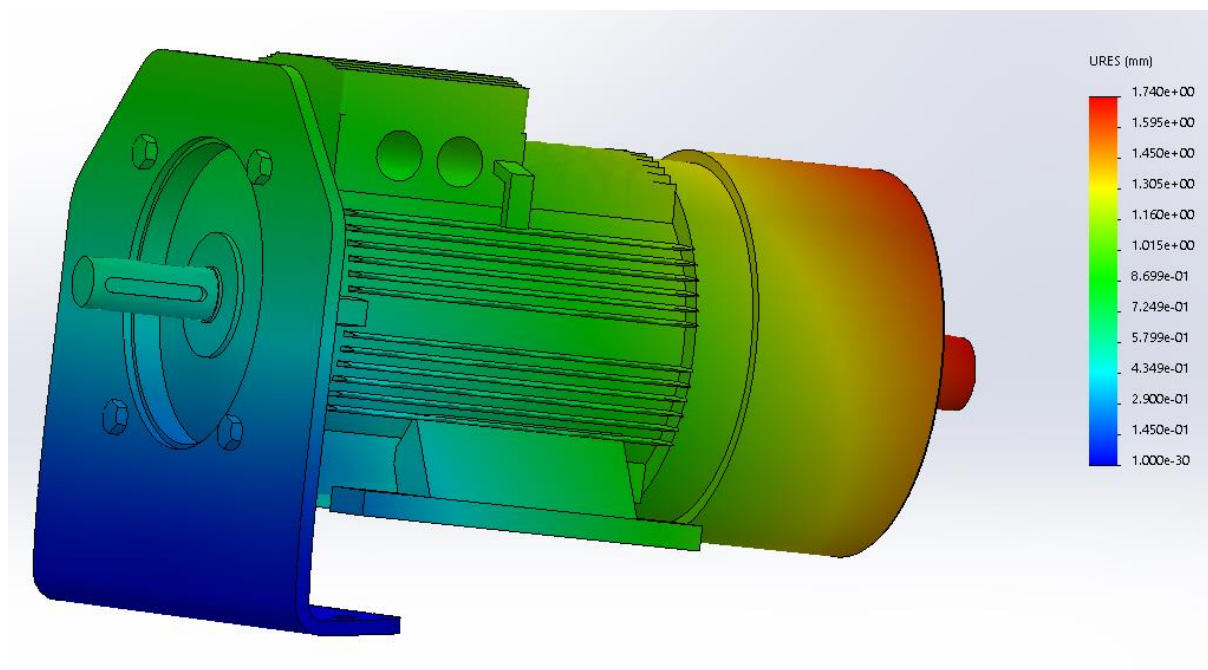
Van de situatie is een EEM simulatie gevoerd welke overeenkomt met de berekende waarden. Zo is in figuur 53 te zien dat op de horizontale lijn waar het eerder berekende oppervlak zich bevindt een kleur wordt getoond met een bijbehorende spanning van ongeveer 25 MPa tot 30 MPa. In een eerdere berekening werd geconcludeerd dat dit 30,5 MPa betreft.

Zoals verwacht treden er geen tot nauwelijks spanningen op in de bovenste helft van de beugel. Opvallend is ook dat de grootste spanning optreedt aan de onderkant van het contact tussen de flens van de elektromotor en de beugel, wat ook te maken heeft met het feit dat de motor in de simulatie wordt beschouwd als een star lichaam. Dit betreft een waarde van 46 MPa en valt ruim binnen de grenzen.



Figuur 53: Optredende spanningen door het gewicht van de elektromotor welke gemonteerd is aan een enkele montagebeugel, afkomstig van een EEM simulatie.

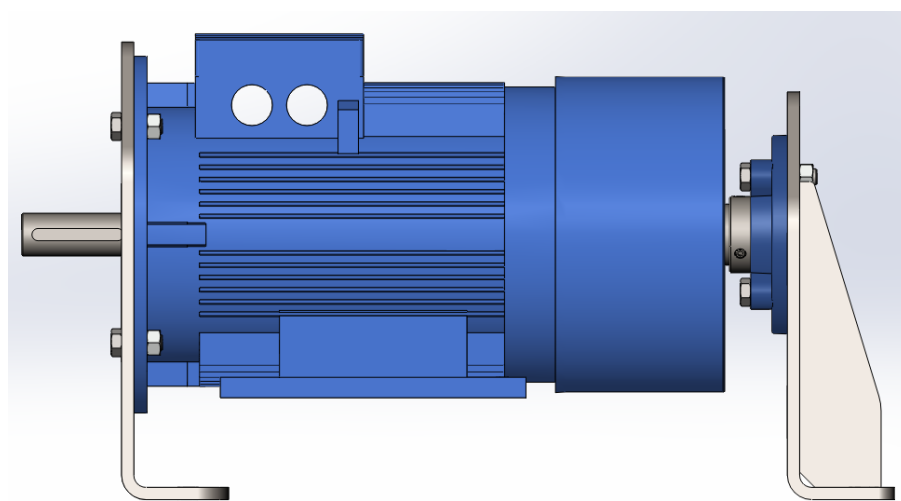
In figuur 54 worden de translaties weergegeven wanneer de beugel onder belasting is. De eerdere berekeningen concludeerden dat het montagepunt, ofwel het centrum van de naaf, onder een hoek van 0,36° naar achter helt waardoor het uiteinde van de uitgaande as een radiale afwijking heeft van 0,69mm naar boven. De kleur van het uiteinde van de uitgaande as in de simulatie laat zien dat dit ongeveer gelijk is aan 0,65mm, wat overeenkomt met de berekeningen.



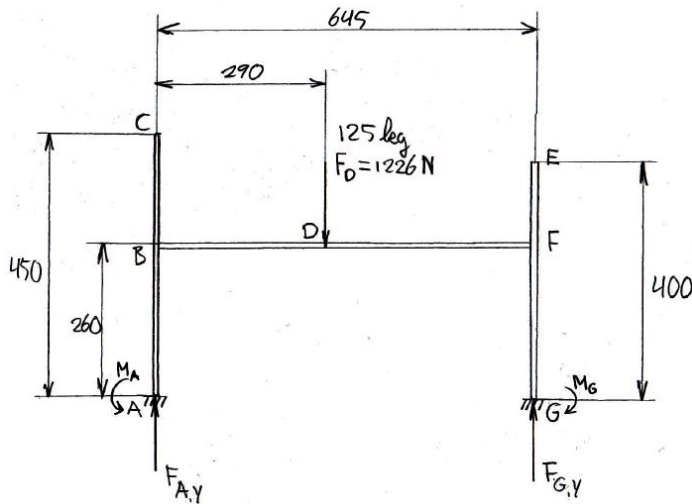
Figuur 54: Optredende translaties door het gewicht van de elektromotor welke gemonteerd is aan een enkele montagebeugel, afkomstig van een EEM simulatie.

F.2 Dubbele ondersteuning elektromotor

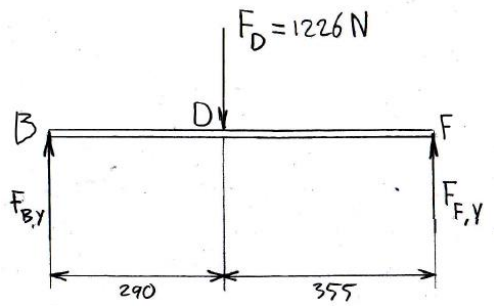
De doorbuiging van beide montagebeugels, waarvan een voorbeeldopstelling wordt weergegeven in figuur 55, wordt berekend om te bepalen wat dit voor invloed heeft op de uitlijning.



Figuur 55: Weergave elektromotor aan twee montagebeugels.



Figuur 56: Vrijlichaamsschema elektromotor aan twee montagebeugels. Balk AC en EG representeren respectievelijk de voor- en achter montagebeugel. Balk BF representeert de motor.



Figuur 57: Reactiekrachten op de montagepunten B en F in beide beugels ten gevolge van het gewicht van de motor.

Allereerst moet bepaald worden wat de reactiekrachten op beide beugels zijn. Aan de hand van de vrijlichaamsschema's in figuren 56 en 57 kunnen de volgende evenwichtsvergelijkingen opgesteld worden:

$$\sum \curvearrowright M_B = 0$$

$$F_{F,y} \times 0,645 - F_D \times 0,29 = 0 \rightarrow F_{F,y} \times 0,645 - 1226 \times 0,29 = 0$$

$$F_{F,y} = 551,2 \text{ N}$$

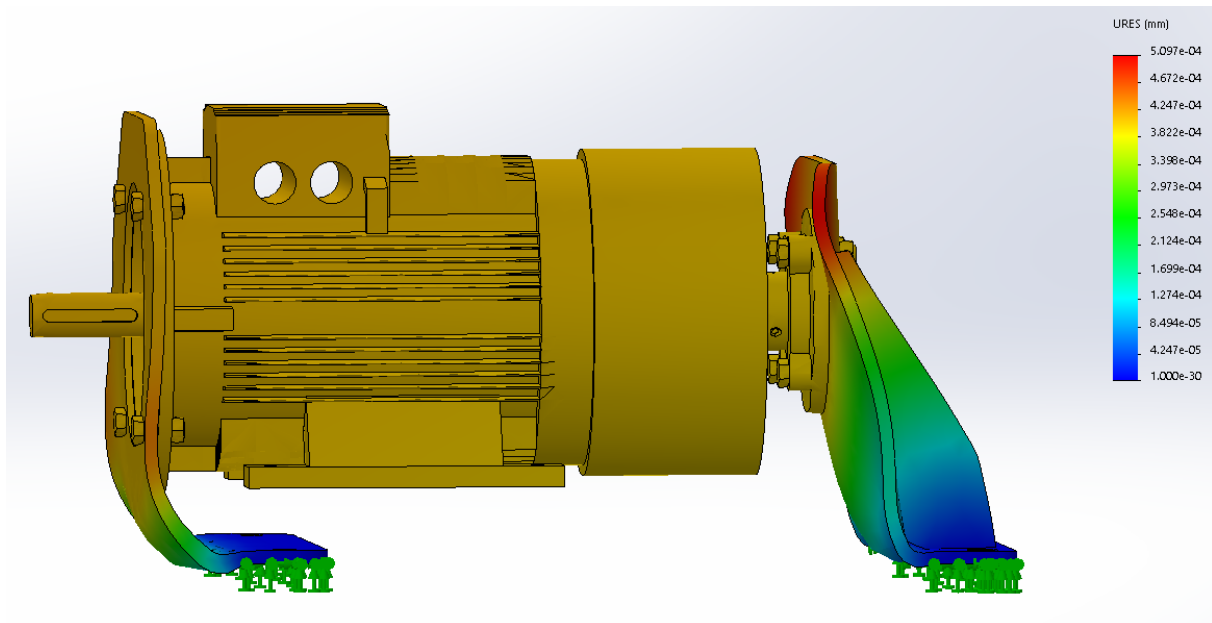
$$\sum \uparrow F_y = 0$$

$$F_{B,y} - F_D + F_{F,y} = 0 \rightarrow F_{B,y} - 1226 + 551,2 = 0$$

$$F_{B,y} = 674,8 \text{ N}$$

Uit de resultaten van de evenwichtsvergelijkingen blijkt dat een kracht van 674,8 N opgevangen wordt door de beugel aan de voorkant (punt B), en 551,2 N aan de achterkant (punt F), respectievelijk ook op de punten A en G. Doordat er geen krachten in de x-richting optreden en buiging in het frame van de motor wordt verwaarloosd kan er worden gesteld dat er geen buiging optreedt in de beugels. Wel treedt er negatieve rek (compressie) in de beugels op ten gevolge van de krachten. Deze is echter zo klein dat een verandering in uitlijning niet waargenomen kan worden.

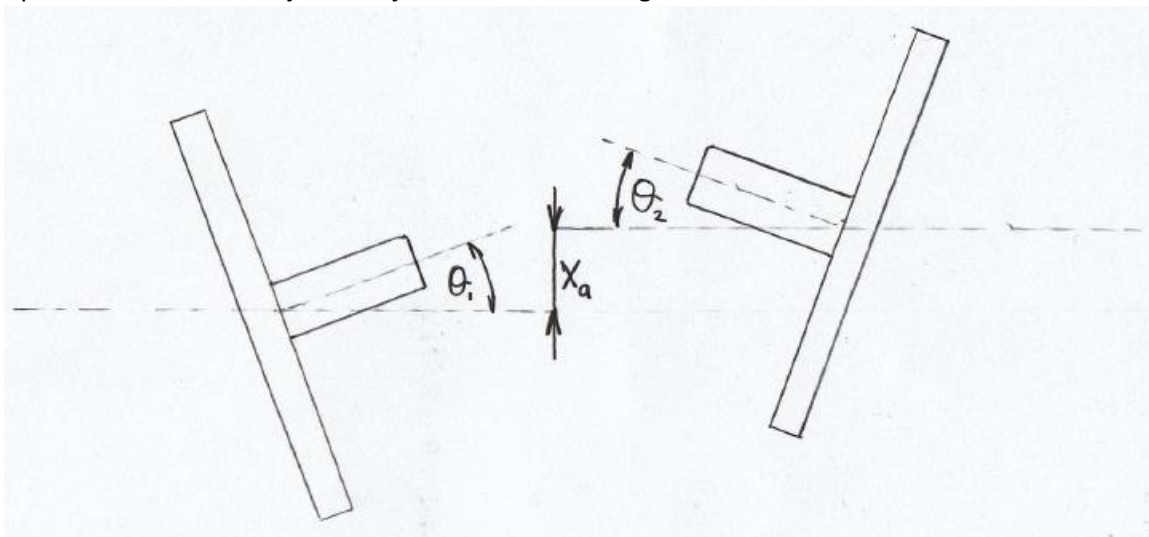
Zo is er ter controle nog een EEM simulatie gemaakt van een dergelijke situatie. Te zien is dat de weergegeven kleur van de elektromotor uit de simulatie ongeveer gelijk is aan een translatie van $4 \cdot 10^{-4}$ mm. Dit is inderdaad te weinig om invloed op de uitlijning te hebben.



Figuur 58: Optredende translaties door het gewicht van de elektromotor welke gemonteerd is aan twee montagebeugels, afkomstig van een EEM simulatie.

F.3 Tolerantie bepaling uitlijning

De uitlijning is afhankelijk van de hoekverdraaiingen in de montagebeugels en de hoogte van de montagepunten in de beugels ten opzichte van het bevestigingsvlak aan de onderkant, zie figuur 59. Uit de berekeningen in deelhoofdstuk F.2 blijkt dat er geen hoekverdraaiing zal zijn in het montagepunt voor de elektromotor wanneer deze ondersteund wordt door twee beugels, dus $\theta_2 = 0^\circ$. Dat wil zeggen dat er ook geen radiale afwijking aan het uiteinde van de as plaatsvindt ten opzichte van de axiale lijn dankzij een hoekverdraaiing.

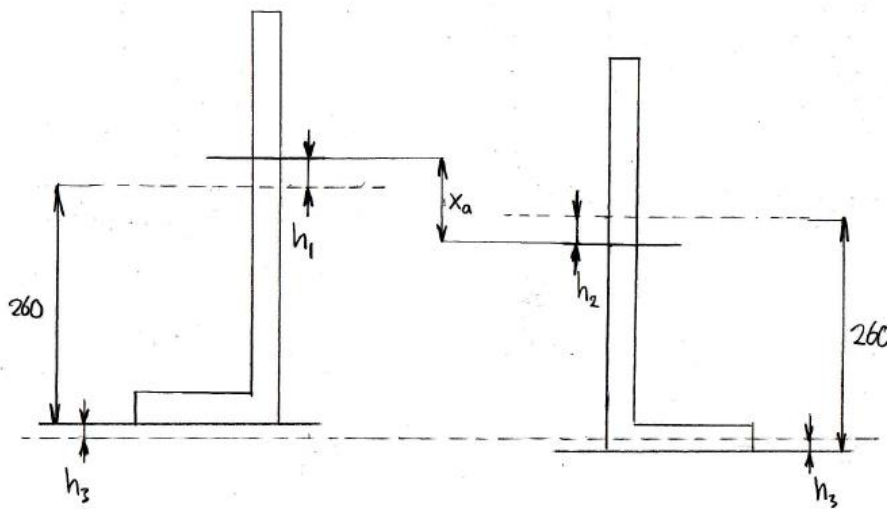


Figuur 59: Situatieschets van de testmotor (links) tegenover de krachtopnemer (rechts).

De montagebeugels van de testmotoren zijn reeds aanwezig. Deze beugels zijn eveneens van 12mm plaatstaal gemaakt en verstevigd met ribben. Met betrekking tot het gewicht van de testmotoren en de overdimensionering van de beugels is gebleken dat de hoekverdraaiing θ_1 in het uiterste geval niet hoger kan worden dan $0,1^\circ$. Deze verdraaiing is verwaarloosbaar met betrekking tot de radiale afwijking van de uitgaande as van de testmotor. Daarom zullen vooral de toleranties op de hoogte van het montagepunt ten opzichte van het bevestigingsvlak aan de onderkant en de vlakheid van de onderplaat betrekking hebben op de uitlijning. Zo kan dus worden gesteld dat de maximale afwijking gelijk is aan:

$$x_a = h_1 + h_2 + h_3$$

In figuur 60 worden deze waarden gevisualiseerd. De variabelen h_1 en h_2 staan voor de afwijkingen van de montagepunten in de beugels ten opzichte van de ideale lijn op een hoogte van 260mm. De variabele h_3 geeft de vlakheidstolerantie aan van de T-gleufplaat.



Figuur 60: Uitlijning dankzij hoogte van montagepunten in de beugels. Stippellijnen laten de ideale situatie zien voor zowel het bevestigingsvlak onderaan de beugels als de axiale lijnen van de uitgaande assen.

De montagepunten in de beugels voor de testmotoren hebben een hoogte van 260mm met tolerantie $\pm 0,1$ mm, dus $h_1 = 0,1$. De T-gleufplaat bevat een vlakheidstolerantie op de oppervlakte van $\pm 0,05$ mm, dus $h_3 = 0,05$. De totale afwijking mag voor de balgkoppeling niet groter zijn dan 0,2mm, dus:

$$x_a = h_1 + h_2 + h_3$$

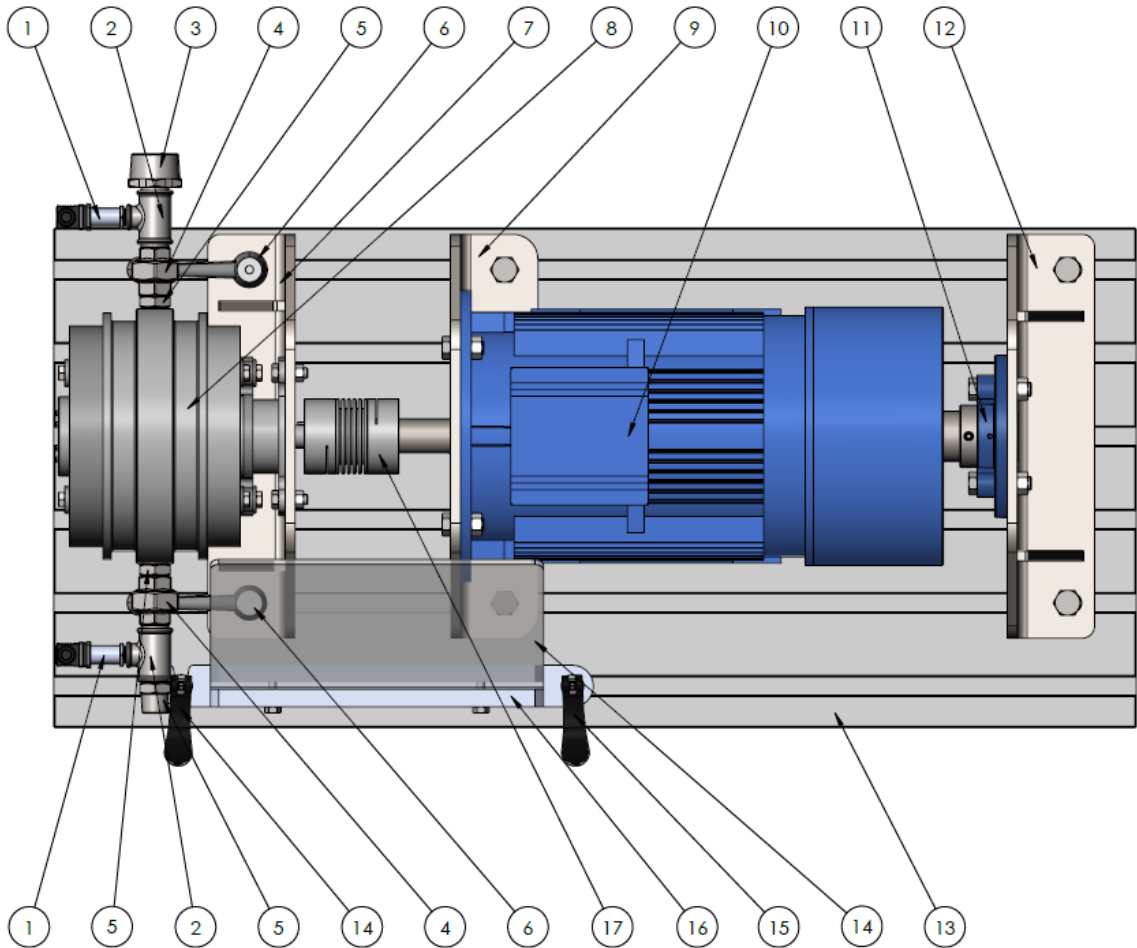
$$0,2 = 0,1 + h_2 + 0,05$$

$$h_2 = 0,05$$

Er zal een tolerantie gekozen worden van 0,1mm voor de hoogte van het montagepunt in de montagebeugel voor de elektromotor. De kans is zeer onaannemelijk dat alle toleranties maximaal zijn en dat de uitlijning net buiten 0,2mm treedt. Wanneer dit door een productiefout of onvoorziene situatie toch optreedt kan het bevestigingsvlak aan de onderkant van de montagebeugel voor de elektromotor enigszins gevlokt worden.

Bijlage G: Stuklijsten

G.1 Stuklijst testopstelling

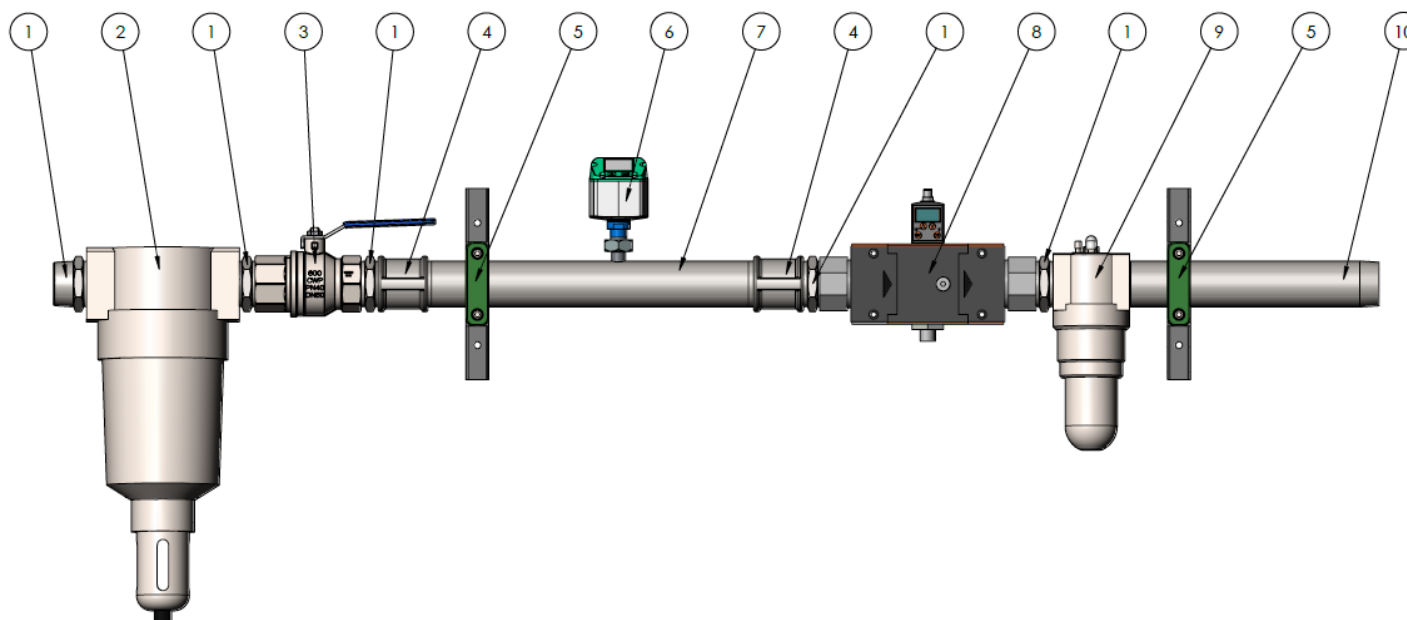


Figuur 61: Overzicht onderdelen van de testopstelling. Getallen in de ballonnen corresponderen met de getallen in tabel G.1. Bevestigingsartikelen worden niet benoemd.

Tabel G.1: Lijst van de benoemde onderdelen uit figuur 61. Bevestigingsartikelen worden niet benoemd.

#Nr.	Onderdeel beschrijving	Qty
1	Druksensor AE-SML-10.0 G1/4"	2
2	ISO 49/EN 10242 T-stuk 130 G1"-G1/4"-G1"	2
3	ISO 49/EN 10242 Verloopnippel 245 R2"-R1"	1
4	ISO 49/EN 10242 3-delige koppeling 335 G1"-R1"	2
5	ISO 49/EN 10242 Verloopnippel 280 R1"	3
6	Klemhefboom K0120.320x50	2
7	Bracket-mount testmotor	1
8	Testmotor (prototype)	1
9	Bracket-mount Sg160L-4	1
10	Elektromotor Sg160L-4	1
11	Lagerhuis UCFC212	1
12	Bracket-mount UCFC212	1
13	T-slot plaat 1300x600x50, gleufbreedte 22	1
14	Lexaan beschermkap	1
15	Excenterhefboom K0005.2501110x50	2
16	Beschermkap montageframe	1
17	Balgkoppeling BKL Series 300 L109 D42-D28	1

G.2 Stuklijst hoofdleiding



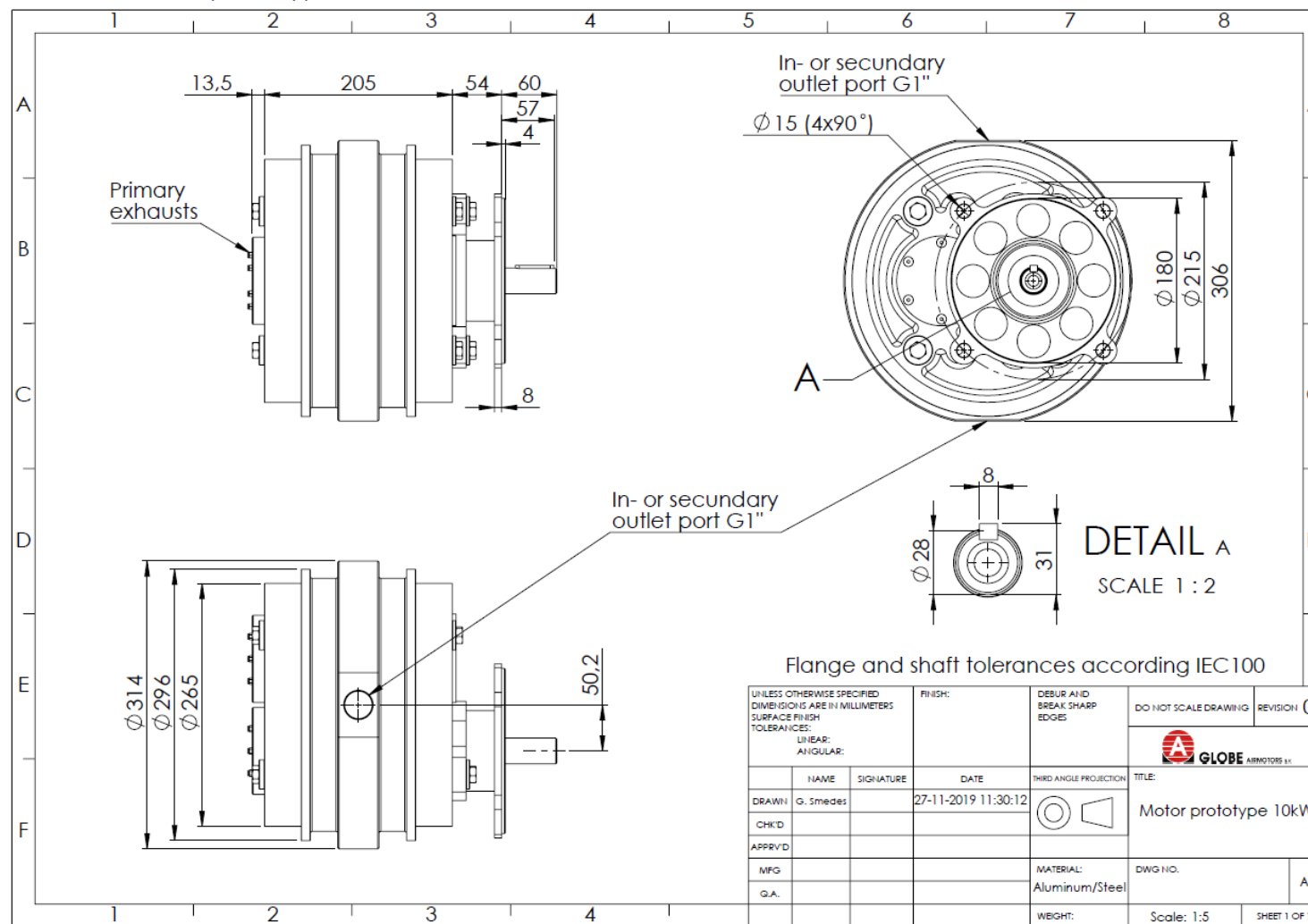
Figuur 62: Overzicht onderdelen van de hoofdleiding. Getallen in de ballonnen corresponderen met de getallen in tabel G.2. Bevestigingsartikelen worden niet benoemd.

Tabel G.2: Lijst van de benoemde onderdelen uit figuur 62. Bevestigingsartikelen worden niet benoemd.

#Nr.	Onderdeel beschrijving	Qty	#Nr.	Onderdeel beschrijving	Qty
1	ISO 49/EN 10242 Verloopnippel 280 R2"	5	6	Flowmeter VA520	1
2	Lucht filter G2"	1	7	Pijpaansluiting VA520 L475 R2"	1
3	Kogelkraan, type 100 G2"	1	8	Drukregelaar REGTRONIC 400 G2"	1
4	ISO 49/EN 10242 Sok 270 G2"	2	9	Olievernevelaar G2"	1
5	Wandklem D60	2	10	Pijp L400 R2"	1

Bijlage H: Datasheets/dimensies testmotoren

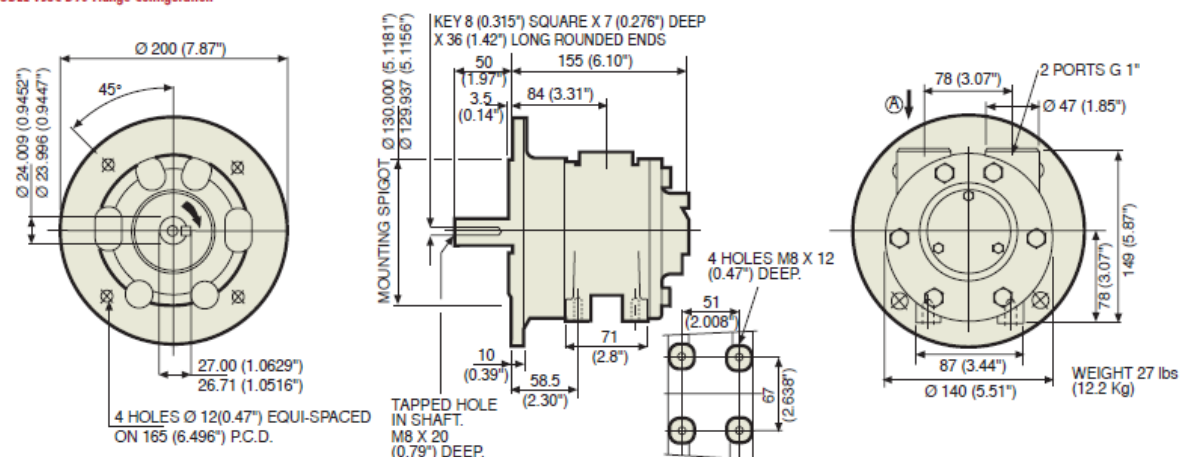
H.1 Luchtmotor prototype 10kW



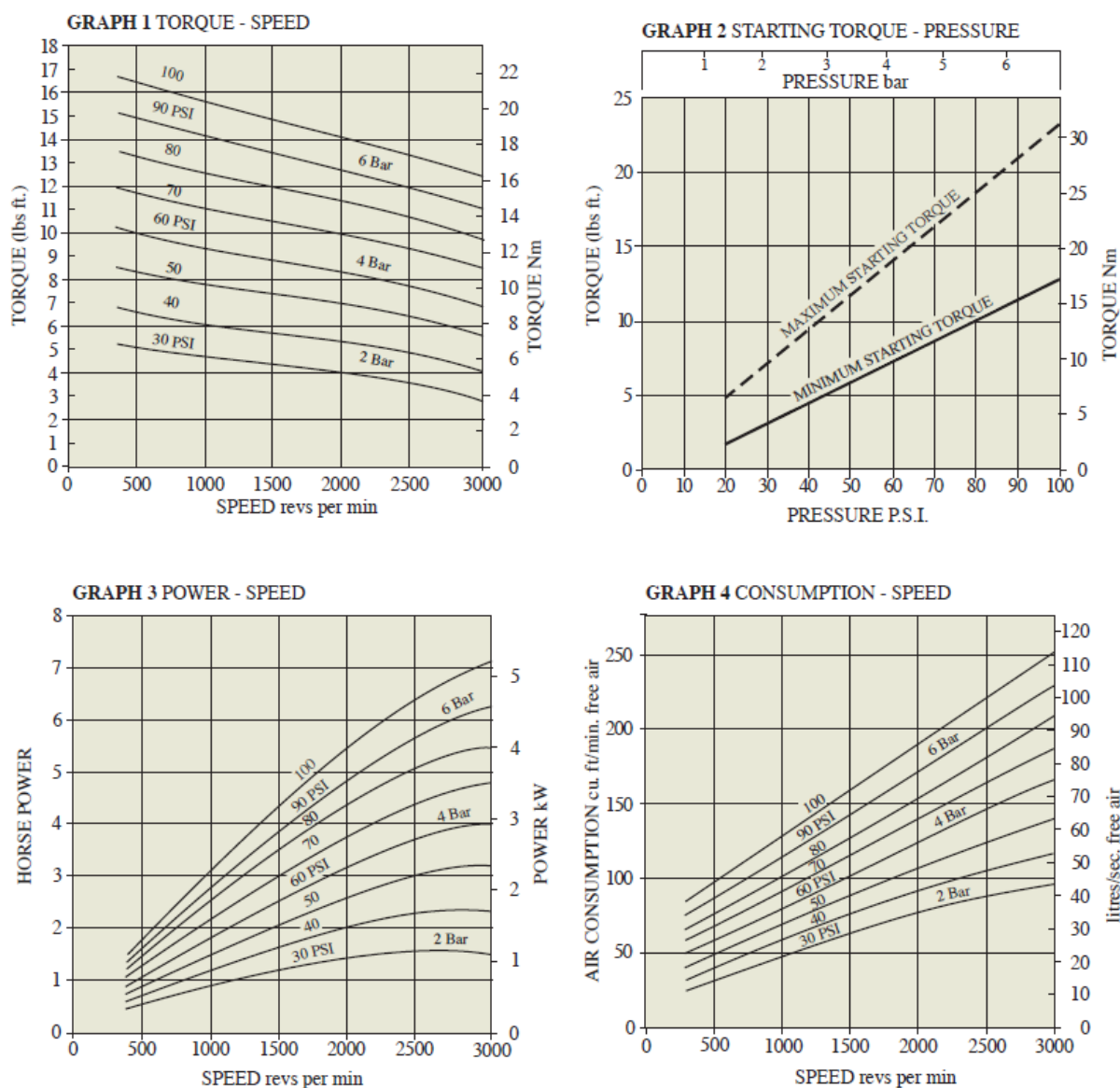
Figuur 63: Hoofddimensies van het luchtmotor prototype.

H.2 Datasheet VS8C

MODEL VS8C D90 Flange Configuration



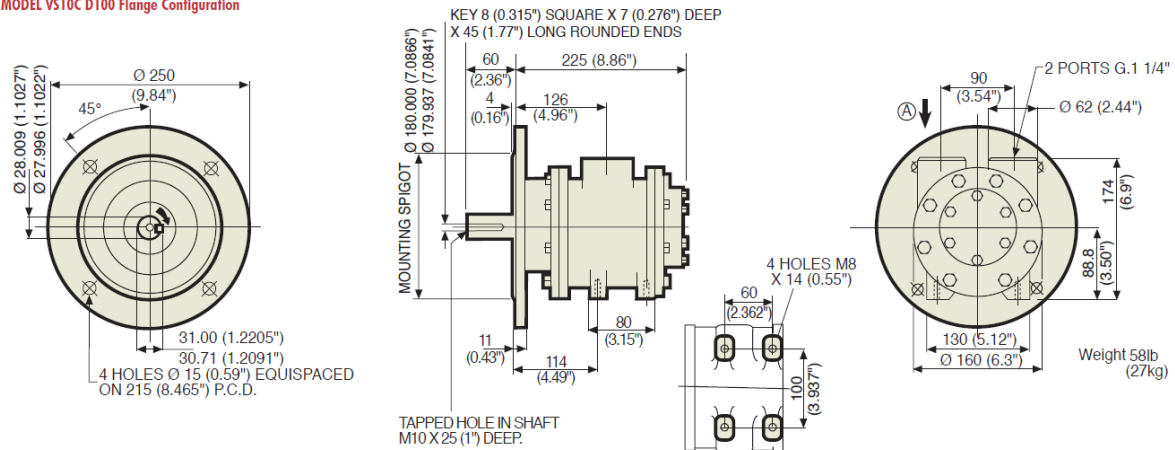
Figuur 64: Dimensies VS8C.



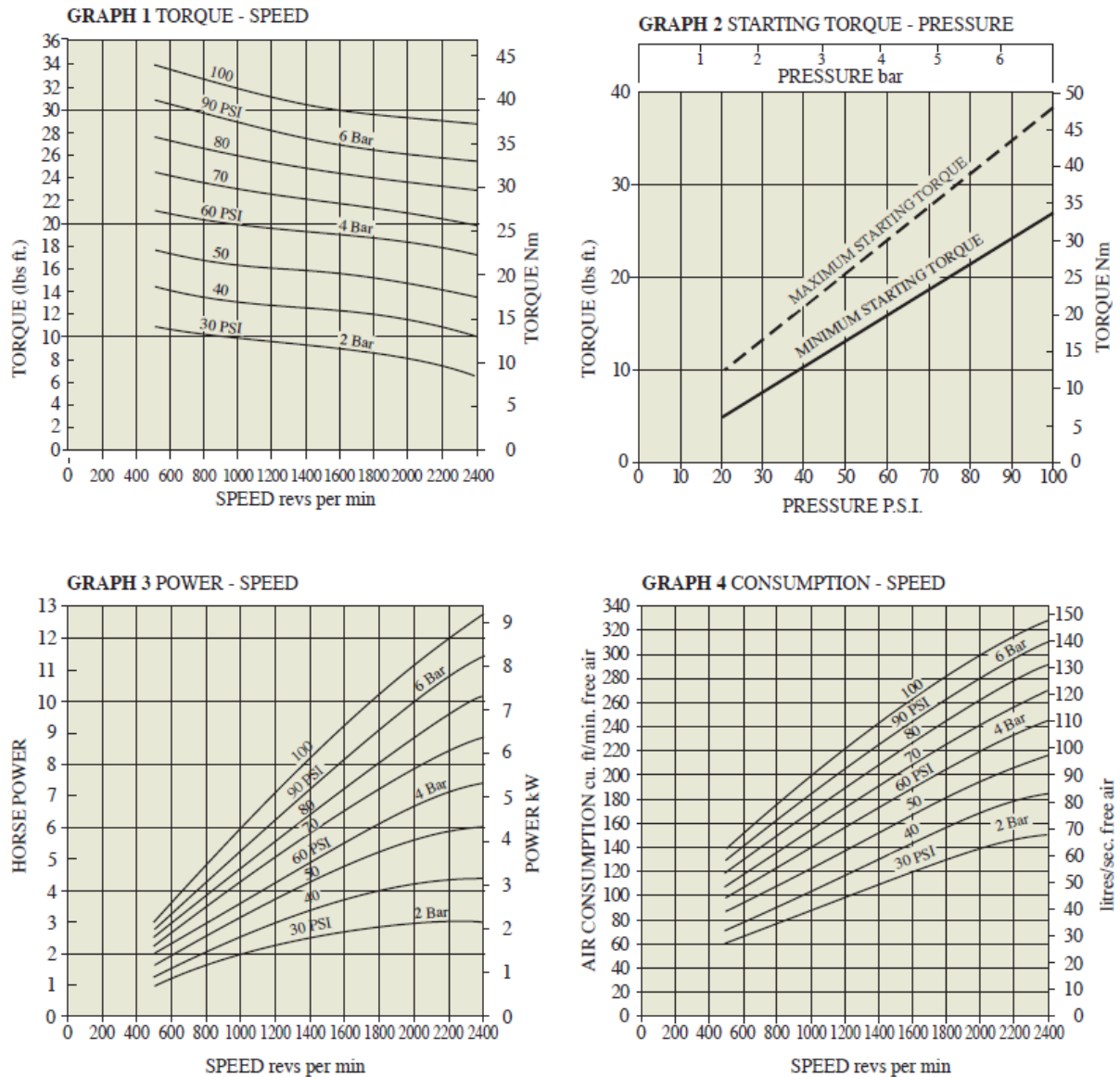
Figuur 65: Grafiekweergave van specificaties VS8C.

H.3 Datasheet VS10C

MODEL VS10C D100 Flange Configuration

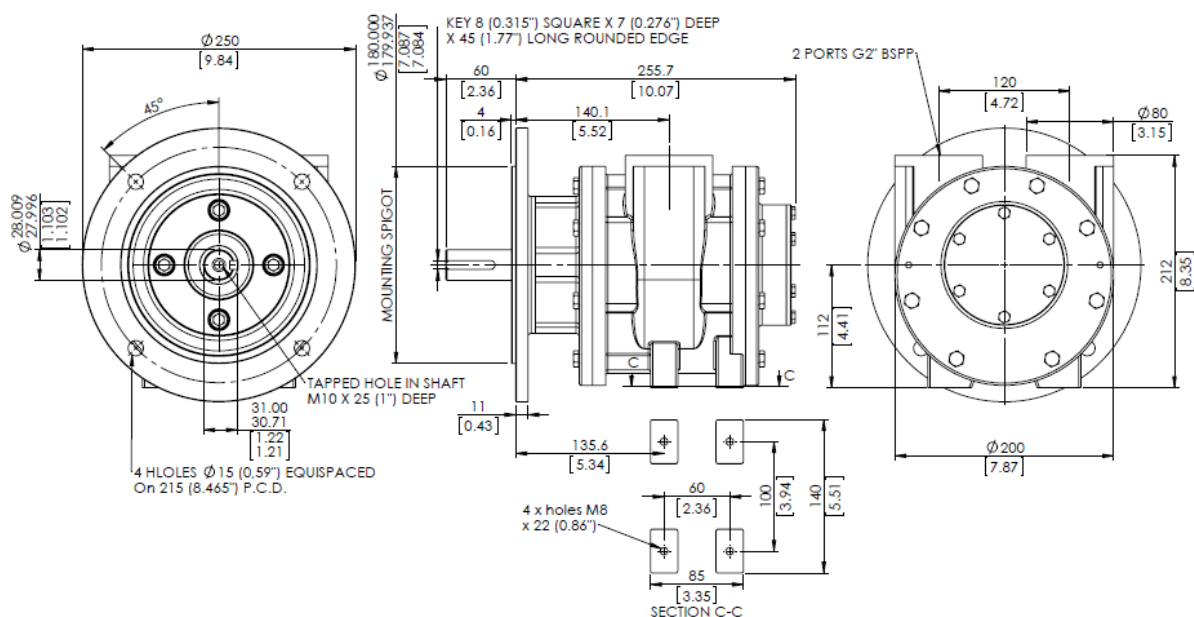


Figuur 66: Dimensies VS10C.

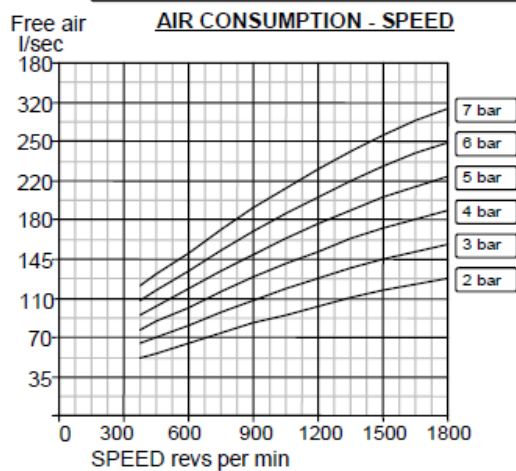
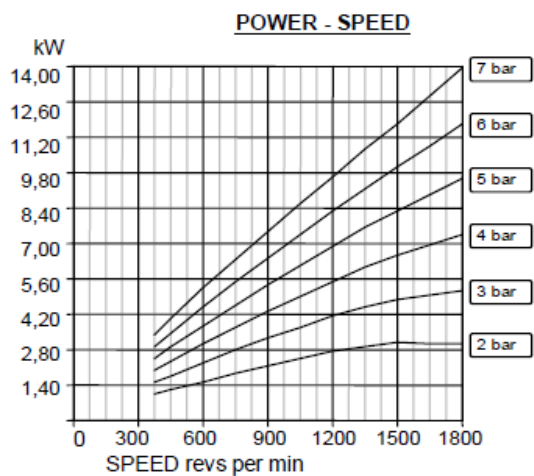
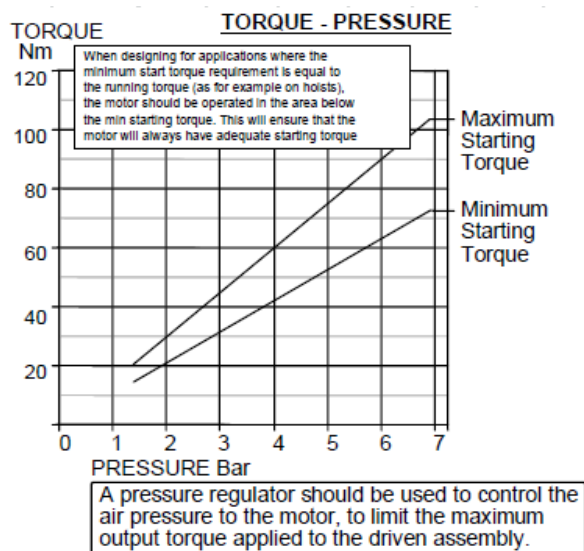
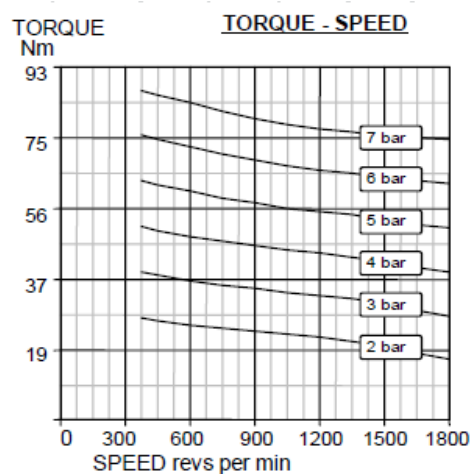


Figuur 67: Grafiekweergave van specificaties VS10C.

H.4 Datasheet VS12C

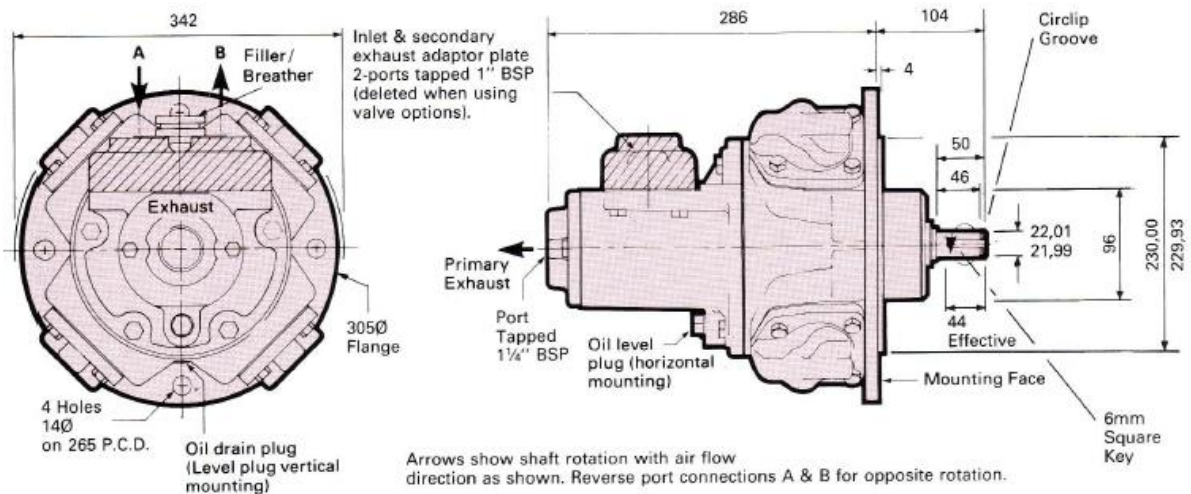


Figuur 68: Dimensies VS12C.



Figuur 69: Grafiekeuweergave van specificaties VS12C.

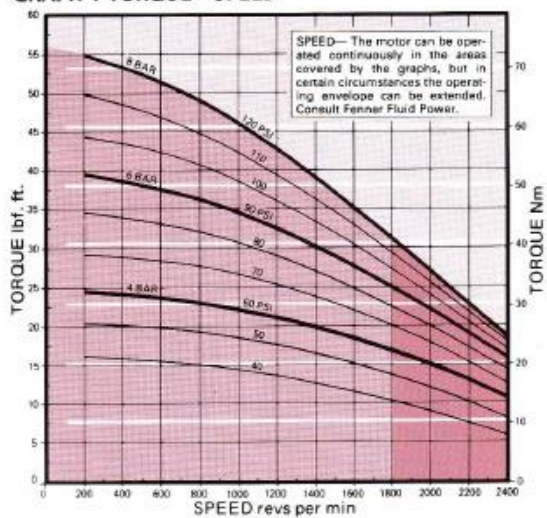
H.5 Datasheet RM310



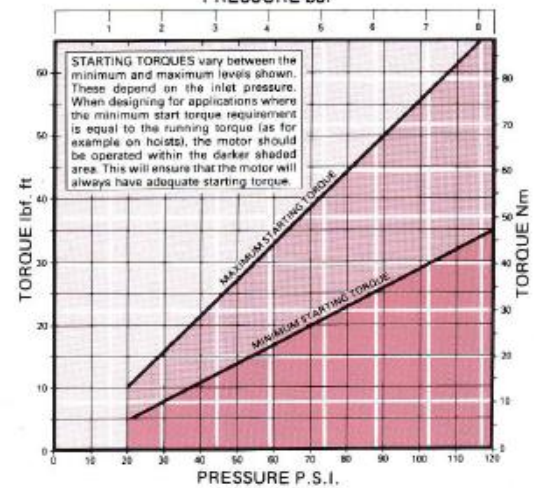
Figuur 70: Dimensies RM310.

READING GRAPHS — Scales have been adjusted to enable bar and p.s.i. to be read from a common curve. Therefore only read p.s.i. with the left hand axis and bar with the right hand axis.

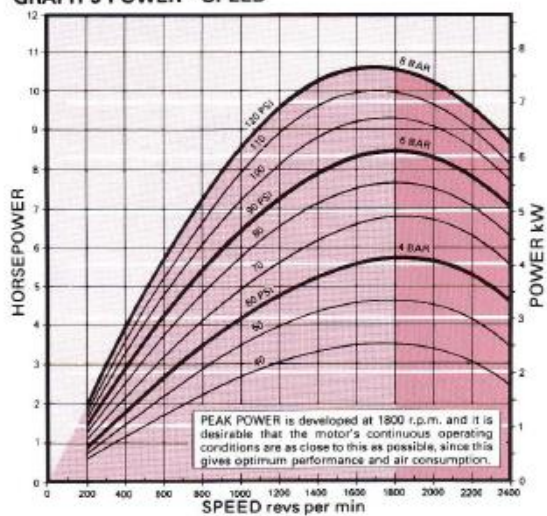
GRAPH 1 TORQUE - SPEED



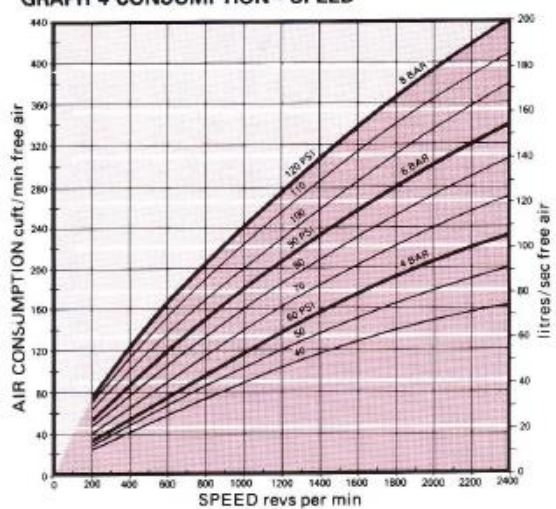
GRAPH 2 STARTING TORQUE - PRESSURE



GRAPH 3 POWER - SPEED

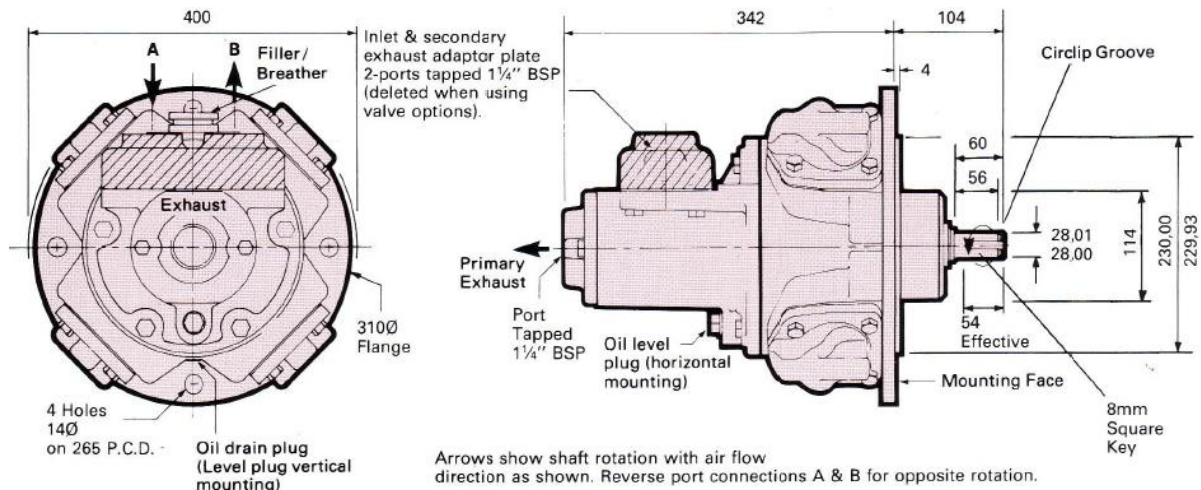


GRAPH 4 CONSUMPTION - SPEED



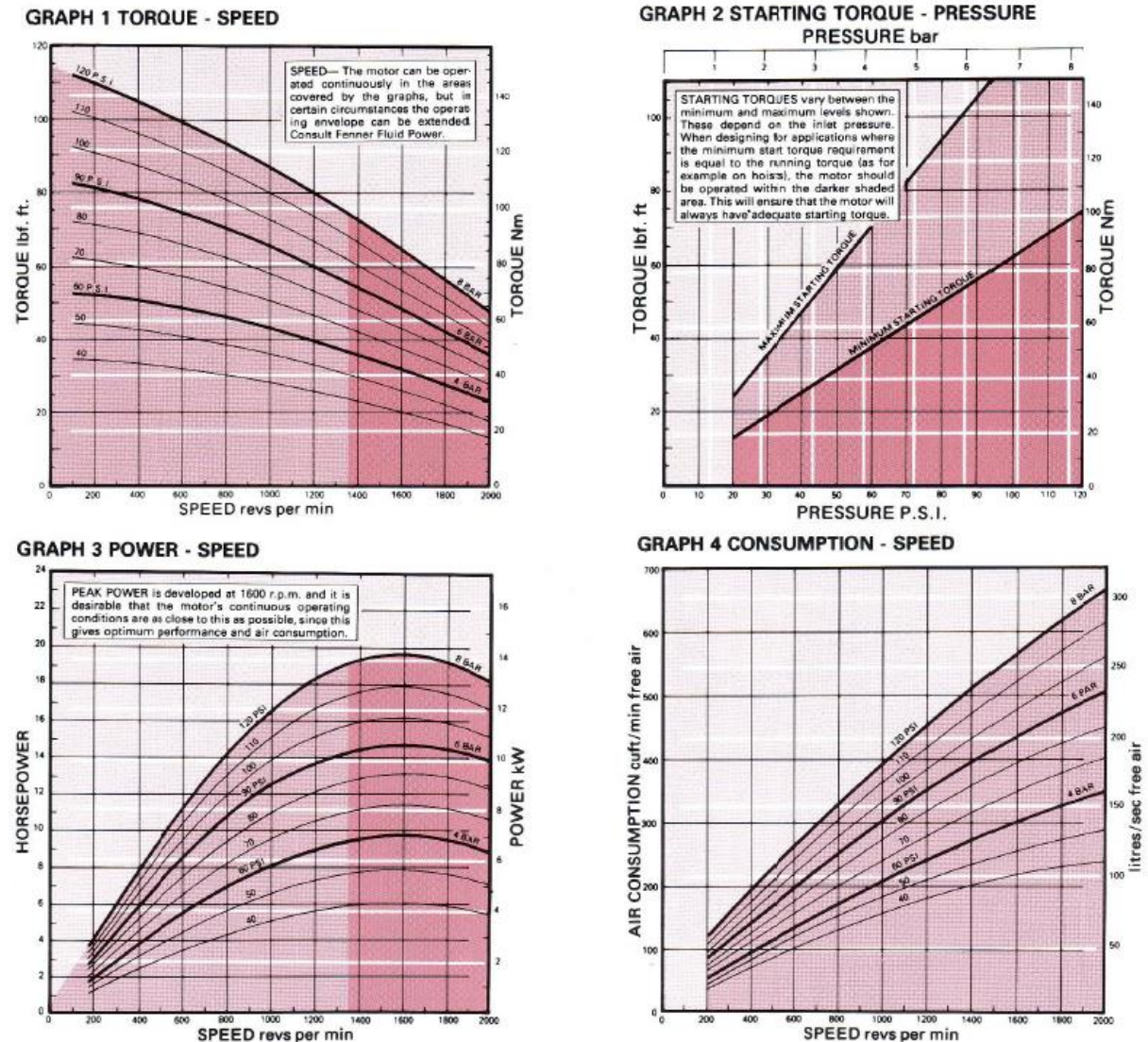
Figuur 71: Grafiekweergave van specificaties RM310.

H.6 Datasheet RM410



Figuur 72: Dimensies RM410.

READING GRAPHS — Scales have been adjusted to enable bar and p.s.i. to be read from a common curve. Therefore only read p.s.i. with the left hand axis and bar with the right hand axis.



Figuur 73: Grafiekweergave van specificaties RM410.

Bijlage I: Datasheets componenten testopstelling

I.1 Elektromotor Sg160L-4

31-10-2019

ELECTRICAL PARAMETERS																	
U	CONN.	f	P		Duty	I	n	T	TL/T	TB/T	IL/I	Efficiency at load [%]			Power factor at load [-]		
V	-	Hz	kW	HP	-	A	rpm	N	-	-	-	2/4	3/4	4/4	2/4	3/4	4/4
400	Δ	50	15	20	S1	27.8	1460	98.12	2.4	3.2	7.3	89.1	89.9	89.5	0.73	0.82	0.87
690	Y	50	15	20	S1	16.1	1460	98.12	2.4	3.2	7.3	89.1	89.9	89.5	0.73	0.82	0.87

GENERAL DATA				
Efficiency class	-		Sound pressure level [dB]	66
Frame size	160		Sound power level [dB]	77
Number of poles	4		Terminal box position	top
Starting method	DOL or Y/Δ		Possibility of terminal box rotation	yes
Insulation class	F		Bearing on D-side	63092Z
Frequency converter supply	yes		Bearing on ND-side	63092Z
Mounting arrangement	IMB3/B5/B35/B14		Bearings regreasing	on demand
Cooling method	IC411		Housing - material	cast iron
Weight (IMB3) [kg]	125		Feet - material	cast iron
Moment of inertia [kgm2]	0.075		Bearing shields - material	cast iron
Direction of rotation	CW/CCW		Painting	RAL5010
Degree of protection	IP55		Climatic execution	N

ENVIRONMENTAL CONDITIONS				
Ambient temperature [°C]	up to +40		Altitude above sea level [m]	up to 1000
Relative humidity [%]	up to 95			

ACCESSORY				
Number of terminals or cables	6		Temperature sensors in bearings	on demand
Cable glands/inlets	1		Winding heaters	on demand
Temperature sensors in winding	on demand		Optional accessories	on demand

STANDARDS	
IEC 60034-1	

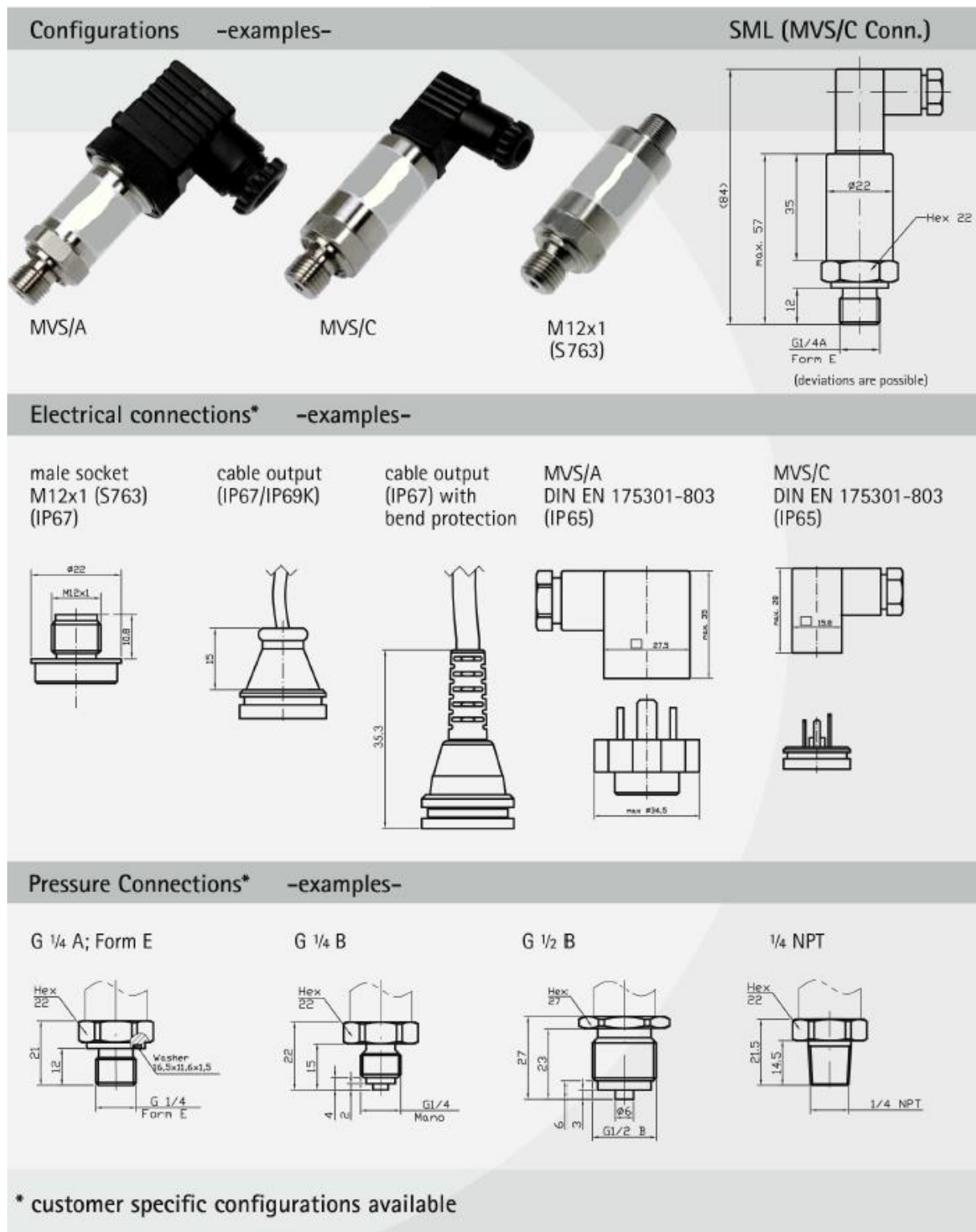
CERTIFICATES	
on demand	

Figuur 74: Specificaties Sg160L-4. Copyright Cantoni Group.

I.2 Druksensor AE-SML-Serie

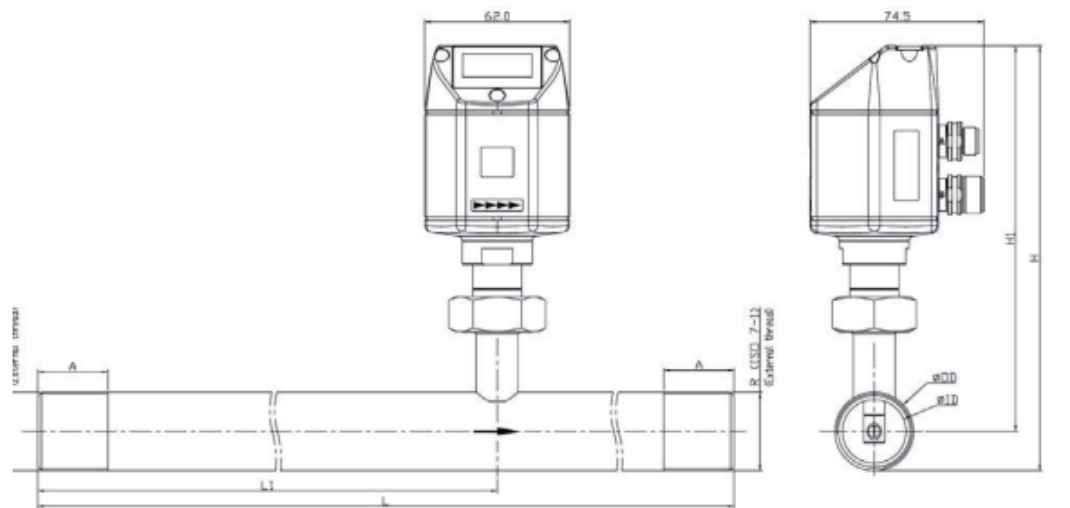
Specifications						
PRESSURE RANGE						
Measuring range*	p [bar]	1,0	1,6	2,0	2,5	4,0 6,0 10,0 16,0
Overload pressure	p [bar]	6	6	6	6	10 20 20 40
Burst pressure	p [bar]	9	9	9	9	15 30 30 60
Measuring range*	p [bar]	20	25	40	60	100 160 200
Overload pressure	p [bar]	40	100	100	200	200 400 400
Burst pressure	p [bar]	60	150	150	300	300 600 600
Measuring range*	p [bar]	250	400	600	1000	
Overload pressure	p [bar]	750	750	840	1200	(other pressure range as -1...0 bar, -1...9/24 bar etc. or absolute pressure are available)
Burst pressure	p [bar]	1000	1000	1050	1500	
ELECTRICAL PARAMETER						
		2-wire	3-wire	3-wire	3-wire	3-wire
Output signal*		4...20 mA	0...20 mA	0...10 V	0...5 V	0,5...4,5 V ratiometric
Supply voltage	U _s [V _{DC}]	10...32**	9...30	12...32	8...32	5 ± 10%
Load resistor	R _L in Ohm	R _L = (U _s -10V)/0,02A	max. 200Ω**	≥ 4.7kΩ	≥ 4.7kΩ	≥ 4.7kΩ
Response time	t [ms]	≤ 2	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Maximum supply current	I [mA]	23	40	10	10	7,5
** > AppNote (see www.adz.de)						
Isolation voltage*	U [V _{DC}]	50	option 500/710			
ACCURACY						
Accuracy @ RT	% of the range ≤ 0,50***	option ≤ 0,25	*** incl. nonlinearity, hysteresis, repeatability, zero-offset- and final-offset (acc. to IEC 61298-2)			
Non-linearity	BFSL ≤ 0,15					
Stability/year	% of the range ≤ 0,15					
ACCEPTABLE TEMPERATURE RANGES						
Measuring medium	T [°C]	-40...125				
Ambience	T [°C]	-40...105				
Storage	T [°C]	-40...125				
Compensated range****	T [°C]	-20...85	**** The mean TC are relevant for the compensated range only, outside the compensated range the total error statements apply.			
Temperature coefficient within the compensated range						
Mean TC offset	% of the range ≤ 0,15 / 10K					
Mean TC range	% of the range ≤ 0,15 / 10K					
Total error	% of the range -40°C 2,00%					
	% of the range 105°C 2,00%					
MECHANICAL PARAMETER						
Parts in contact with the measuring medium			stainless steel			
Housing			stainless steel			
Weight	m [g]	80-120	depending on design			
Shock resistance/drop	g	1000	acc. to DIN EN 60068-2-32 – free fall			
Vibration resistance	g	20	acc. to DIN EN 60068-2-6 – vibration sinusoidal			
Shock resistance/constant	g	50	acc. to DIN EN 60068-2-27 – shock			
Approvals	CE Declarations of conformity 2014/30/EU, 2014/68/EU German Lloyd, Railway application DIN EN 50155					
IP system of protection (IEC 605029) up to IP69K			The IP system of protection as specified in the data sheets generally applies, with appropriate mating plug connected.			

Figuur 75: Specificaties AE-SML-Serie. Copyright AESensors.



Figuur 76: Dimensies AE-SML-Serie. Copyright AEsensors.

I.3 Debietsensor VA520



Flow measuring ranges VA 520 for compressed air (ISO 1217:1000 mbar, 20 °C)

Connection thread	Outer pipe dia. mm	Inner pipe dia. mm	Measuring range from to	L mm	L1 mm	H mm	H1 mm	A mm
R 1/4"	13.7	8.9	0.1 90 l/min	194	137	174.7	165.7	15
R 1/2"	21.3	16.1	0.2 90 m³/h	300	210	176.4	165.7	20
R 3/4"	26.9	21.7	0.3 170 m³/h	475	275	179.2	165.7	20
R 1"	33.7	27.3	0.5 290 m³/h	475	275	182.6	165.7	25
R 1 1/4"	42.4	36.0	0.7 530 m³/h	475	275	186.9	165.7	25
R 1 1/2"	48.3	41.9	1.0 730 m³/h	475*	275	186.9	165.7	25
R 2"	60.3	53.1	2.0 1195 m³/h	475*	275	195.9	165.7	30

*Attention: Shortened inlet section! Please observe the recommended minimum inlet section (length = 10 x inner diameter) on site!

Description	Order No. Stainless steel 1.4404	Order No. Stainless steel 1.4301
VA 520 flow sensor with integrated 1/4" measuring section	0695 1520	0695 0520
VA 520 flow sensor with integrated 1/2" measuring section	0695 1521	0695 0521
VA 520 flow sensor with integrated 3/4" measuring section	0695 1522	0695 0522
VA 520 flow sensor with integrated 1" measuring section	0695 1523	0695 0523
VA 520 flow sensor with integrated 1 1/4" measuring section	0695 1526	0695 0526
VA 520 flow sensor with integrated 1 1/2" measuring section	0695 1524	0695 0524
VA 520 flow sensor with integrated 2" measuring section	0695 1525	0695 0525
Option High-pressure version PN 40		Z695 0411
Option 1 % Accuracy of m.v. ± 0.3 % of f.s.		Z695 5005
Special measuring range VA 520 according to customer's requirements		Z695 4006
Connection cables:		
Connection cable 5 m (power supply, analogue output)		0553 0104
Connection cable 10 m (power supply, analogue output)		0553 0105
Pulse cable for flow sensors with M12 plug, length 5 m		0553 0106
Pulse cable for flow sensors with M12 plug, length 10 m		0553 0107
Further accessories:		
Closing cap for meas. section (Material: Aluminium)		0190 0001
Closing cap for meas. section (Material: Stainless steel 1.4404)		0190 0002
CS Service Software for FA/VA sensors incl. PC connection set, USB interface and interface adapter to the sensor		0554 2007
Mains unit in wall housing 100-240 V, 10 VA, 50-60 Hz/24 VDC, 0.35 A		0554 0108
AC adapter plug 100-240 V AC/ 24 V for VA/FA 500/520		0554 0109
5 point precision calibration with ISO certificate		3200 0001

Technical data

VA 520

Parameters: m³/h, l/min (1000 mbar, 20°C) in case of compressed air resp. Nm³/h, Nl/min (1013 mbar, 0°C) in case of gases

Units adjustable via keys at display: m³/h, m³/min, l/min, l/s, ft/min, cfm, m/s, kg/h, kg/min

Meas. principle: calorimetric measurement

Sensor: Thermal mass flow sensor

Meas. medium: air, gases

Gas types adjustable via keys at display: air, nitrogen, argon, nitrous oxide, CO2, oxygen

Meas. range: see table at the left

Accuracy: ± 1.5 % of m.v. ± 0.3 % of f.s.
accuracy class L1*
(m.v.: of meas. value)
(f.s.: of full scale)

Operating temp.: -30...80 °C

Operating pressure: up to 16 bar
optional up to PN 40

Digital output: RS 485 interface, Modbus-RTU

Analogue output: 4...20 mA for m³/h resp. l/min

Pulse output: 1 pulse per m³ resp. per liter galvanically separated

Power supply: 24 VDC smoothed ± 15 %

Burden: < 500 Ω

Housing: polycarbonate

Meas. section: stainless steel, 1.4301 or 1.4404

Mounting thread meas. section: R 1/4", R 1/2", R 3/4", R 1", R 1 1/4", R 1 1/2", R 2" external thread.

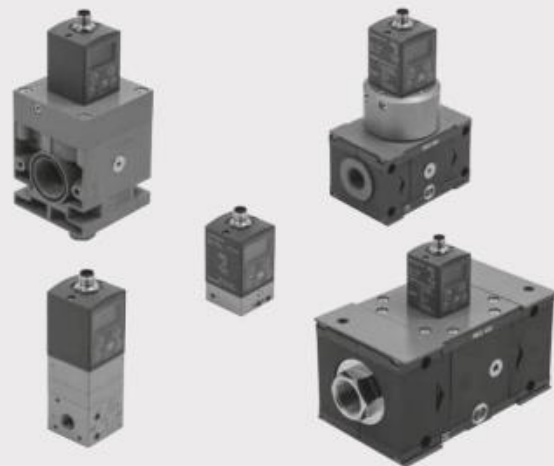
Figuur 77: Specificaties en dimensies VA520. Copyright CS instruments.

I.4 Elektronische drukregelaar REGTRONIC serie

Proportional pressure regulators series REGTRONIC have the job of precisely regulating the pressure in a system, the variables depending on the input command. Remote control regulators are controlled by means of an M12x1 cable and connector and can have Volt, mA or RS232 control. Regulators with a display can be controlled via a cable or directly using the keys below the display. The pressure value and a series of information and diagnostics are visible at all times on the graphic display.

The user-display interface, LEDs and buttons are all on one side.

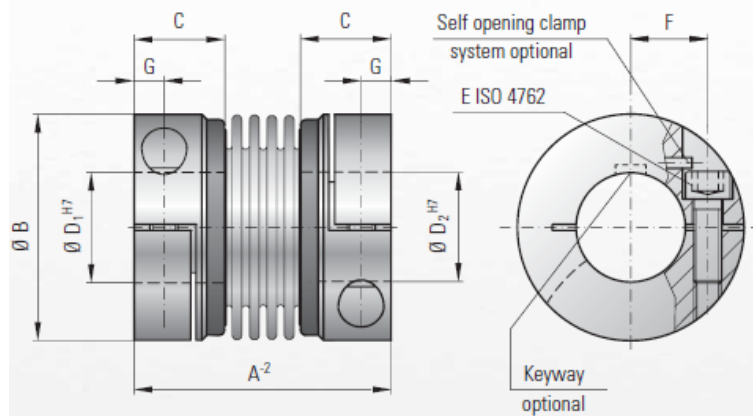
The programming and reading software is comprehensive, simple and intuitive. Pressure control takes place in a "closed-loop" with an electronic precision pressure sensor that measures the downstream pressure, a control system that compares it with the desired pressure, and two mini solenoid valves that adjust the pressure to reach the target value.



TECHNICAL DATA		REGTRONIC		REGTRONIC NEW DEAL		REGTRONIC 300		REGTRONIC 400					
Threaded port		M5	1/8"	1/4"	3/4"	1"	1 1/2"	3/4"	1"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"
Fluid		Filtered, unlubricated air. The air must be filtered at least 10 µm											
MIN inlet pressure	bar	Regulation pressure + 1 bar											
MAX inlet pressure	bar	11											
Temperature range	°C	0 - 50											
Pressure regulation range	bar	0.05 - 10 (settable full scale and minimum pressure)											
Flow rate at 6.3 bar ΔP 0.5	Nl/min	10	770	1490	10000	4500	18000	20000					
Flow rate at 6.3 bar ΔP 0.1	Nl/min	10	1050	1700	13000	7000	-	-					
Exhaust flow rate at 6.3 bar with 0.1 bar overpressure	Nl/min	2	320	500	1800	250	400	400					
Exhaust flow rate at 6.3 bar with 0.5 bar overpressure	Nl/min	9	650	1200	2000	500	850	850					
Weight	kg	0.2	0.38	0.38	1.3	1.5	5	5.8					
Class of protection		65											
Power supply		24 Vcc +10% -5% I max 110 mA											
Input signal (input impedance)	Voltage	0 - 5 Vcc, 0 - 10 Vcc (approx. 6.3 KΩ)											
	Current	4 - 20 mA (approx. 100 Ω)											
	Serial ports	RS 232											
	Manual	Keypad											
Output signal	Analog	0 - 10 Vcc (1 V=1bar) - 1 mA max											
	Digital	PNP open collector output: max 24V 60 mA NPN open collector output: max 24V 60 mA											
Linearity		≤ ± 0.5% (Full scale)											
Hysteresis		≤ ± 0.2% (Full scale)											
Repeatability		≤ ± 0.2% (Full scale)											
Sensitivity/Dead-band		setting range 10 - 100 mbar											
Output pressure (display version)	Accuracy	≤ ± 0.3% (Full scale)											
	Unit of measurement	bar, MPa, psi											
	Minimum resolution	0.01 bar - 0.001 MPa - 0.01 psi											
Analog output accuracy		≤ ± 0.4% (Full scale)											
Temperature characteristics		max 2 mbar / °C											
Response time with ΔP =1 bar		volume 100 cc					volume 1000 cc						
from 6 to 7 bar	s	0.5	0.2	0.3	0.45	0.35							
from 7 to 6 bar	s	0.55	0.3	0.3	0.45	0.7							
Installation position		In any position											
Notes		The features shown refer to the static condition only. With air consumption on the output side, the pressure may vary. On all versions you can set the parameters using the software "MWRRegtronic" downloadable from the website www.metalwork.eu . To connect the PC to Regtronic you can use the cable code W0970513019 (see page 3-220).											

Figuur 78: Specificaties REGTRONIC serie. Copyright Metalwork.

I.5 Balgkoppeling BKL series



Ordering example

BKL / 80 / 26 / 22 / XX

Model
Series / Nm
Bore Ø D1 H7
Bore Ø D2 H7
Non standard e.g. stainless steel

Features:

- easy to mount
- low moment of inertia
- low cost

Material:

Bellows made from highly flexible, high grade stainless steel; see below for hub material

Design:

With a single ISO 4762 radial clamping screw per hub
Self opening clamp system optional: Loosening the clamping screw applies force to the pin, which forces the clamp into the open position for easy mounting and dismounting
Absolutely backlash free due to frictional clamp connection

Temperature range: -30 to +100° C (-22 to +212° F)

Speeds:

Up to 10,000 rpm; in excess of 10,000 rpm with finely balanced version (up to G = 2.5)

Service life:

Maintenance free with infinite life when operated within the technical specifications

Brief overloads:

Acceptable up to 1.5x the rated torque

Fit tolerance:

Overall clearance between hub and shaft 0.01-0.05 mm

Non standard applications:

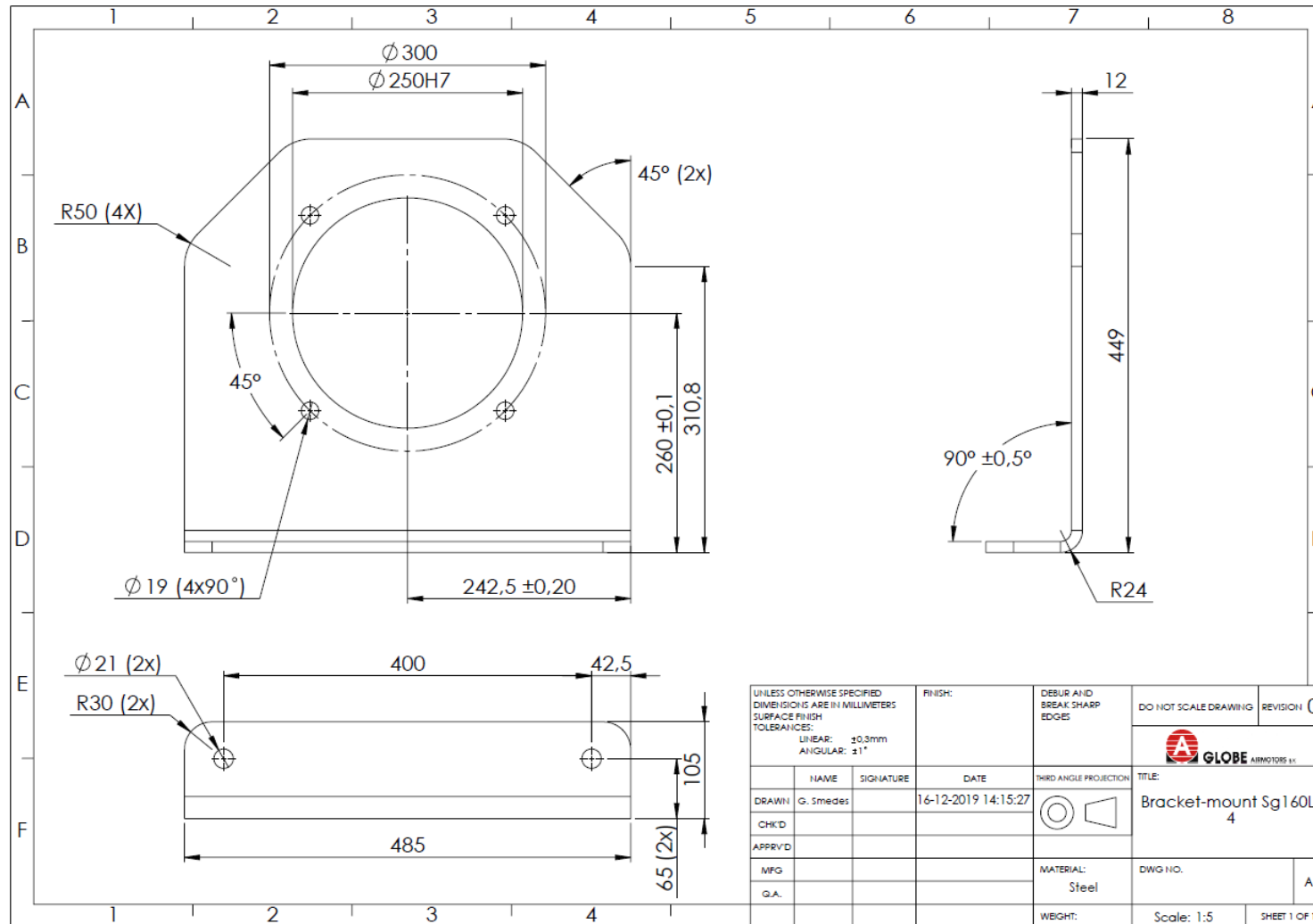
Custom designs with various tolerances, keyways, materials, dimensions, etc. available upon request

Model BKL		Series									
		2	4.5	10	15	30	60	80	150	300	500
Rated torque (Nm)	T _{KN}	2	4.5	10	18	30	60	80	150	300	500
Overall length (mm)	A	30	40	44	58	68	79	92	92	109	114
Outside diameter (mm)	B	25	32	40	49	56	66	82	82	110	123
Fit length (mm)	C	10.5	13	13	21.5	26	28	32.5	32.5	41	42.5
Inside diameter possible from Ø to Ø H7 (mm)	D _{1/2}	4-12.7	6-16	6-24	8-28	10-32	14-35	16-42	19-42	24-60	35-62
Fastening screw ISO 4762	E	M3	M4	M4	M5	M6	M8	M10	M10	M12	M16
Tightening torque of the fastening screw (Nm)		2.3	4	4.5	8	15	40	70	85	120	200
Distance between centerlines (mm)	F	8	11	14	17	20	23	27	27	39	41
Distance (mm)	G	4	5	5	6.5	7.5	9.5	11	11	13	17
Moment of inertia (10 ⁻³ kgm²)	J _{total}	0.002	0.007	0.016	0.065	0.12	0.3	0.75	1.8 0.8	7.5 3.1	11.7 4.9
Hub material		Al optional steel	Al optional steel	Al optional steel	Al optional steel	Al optional steel	Al optional steel	Al optional steel	steel optional Al	steel optional Al	steel optional Al
Approximate weight (kg)		0.02	0.05	0.06	0.16	0.25	0.4	0.7	1.7 0.75	3.8 1.6	4.9 2.1
Torsional stiffness (10 ⁹ Nm/rad)	C _T	1.5	7	9	23	31	72	80	141	157	290
Axial ± (mm)	Max. values	0.5	1	1	1	1	1.5	2	2	2	2.5
Lateral ± (mm)		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Angular ± (degree)		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Axial spring stiffness (N/mm)	C _a	8	35	30	30	50	67	44	77	112	72
Lateral spring stiffness (N/mm)	C _r	50	350	320	315	366	679	590	960	2940	1450

Figuur 79: Specificaties BKL series. Copyright VarioDrive.

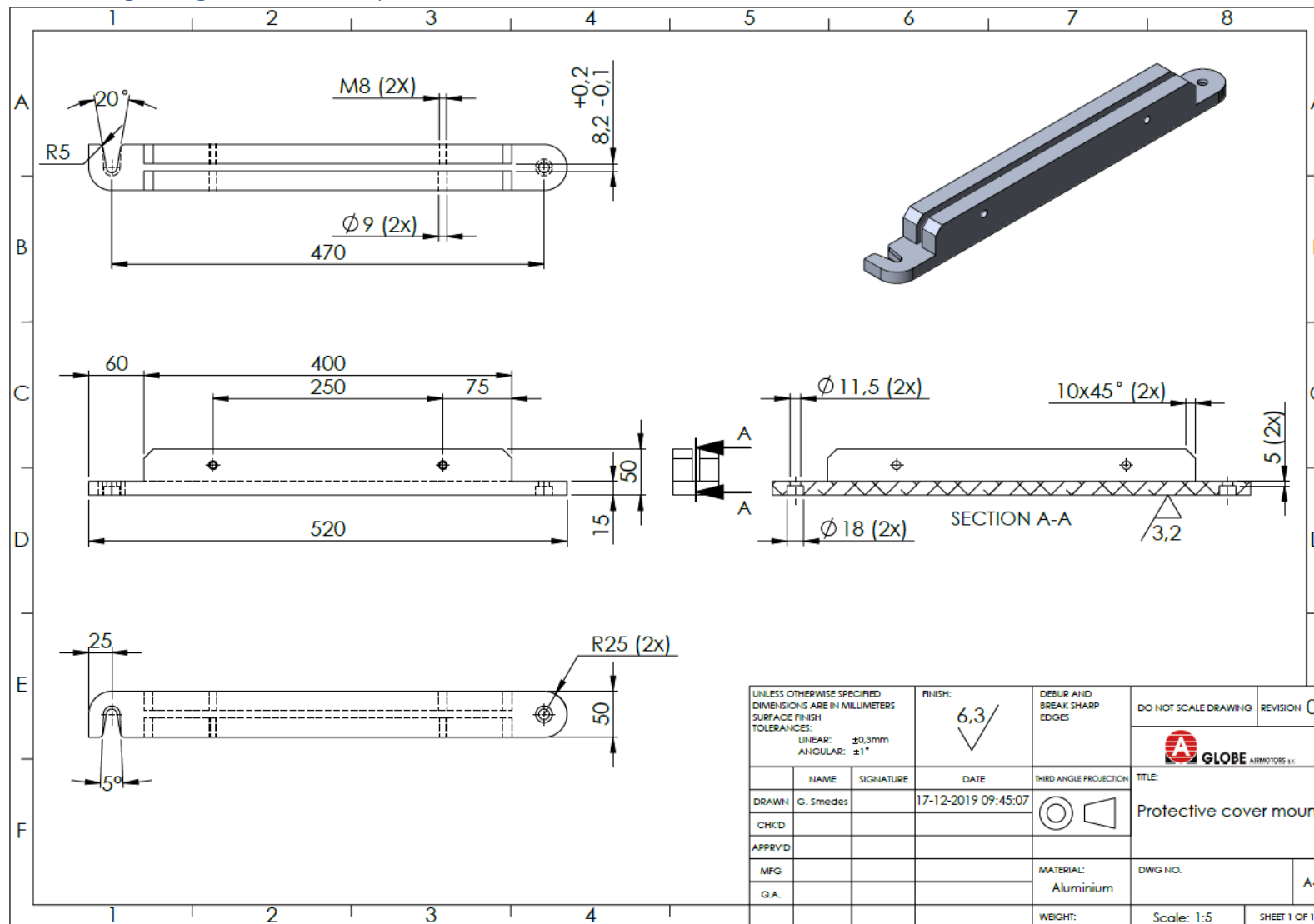
Bijlage J: Tekeningen productieonderdelen

J.1 Montagebeugel elektromotor



Figuur 80: Tekening van de montagebeugel voor de elektromotor.

J.2 Montagebeugel beschermkap



Figuur 81: Tekening van de montagebeugel voor de beschermkap.

Technical drawing of a protective cover for a 12V 100Ah battery. The drawing includes a front view (left) and a side view (right).

Front View Dimensions:

- Overall Width: 400
- Overall Height: 372
- Top Flange Thickness: 17 (2x)
- Bottom Flange Thickness: 8
- Mounting Hole Spacing: 250
- Mounting Hole Center-to-Edge Distance: 75
- Mounting Hole Diameter: $\phi 9$ (2x)

Side View Dimensions:

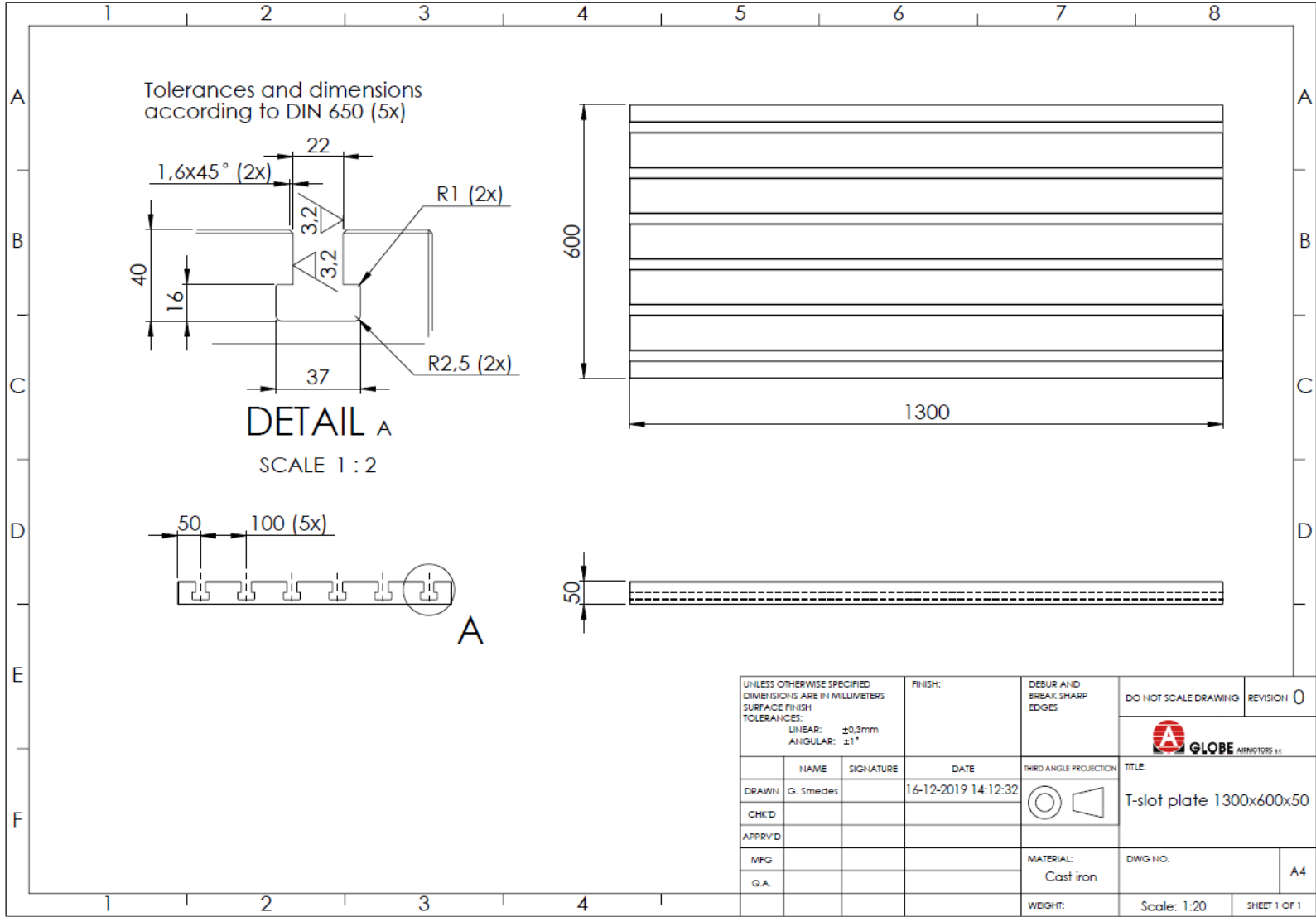
- Angle: 140°
- Radius: R10 (2x)

Table:

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR: $\pm 0.5\text{mm}$ ANGULAR: $\pm 3^\circ$			FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION 0
	NAME	SIGNATURE	DATE	THIRD ANGLE PROJECTION		
DRAWN	G. Smedes		17-12-2019 09:46:44		TITLE: Protective cover	
CHK'D					DWG NO.	
APPRVD					A-	
MFG					Scale: 1:5	
G.A.				WEIGHT:	SHEET 1 OF 1	

120

J.4 T-gleuf plaat



Figuur 83: Tekening van de T-gleuf plaat.